

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр
Освітній рівень

Удосконалений метод керування електричним двигуном робота
Назва теми

КВРАКІТ. 2022162.01.02.ПЗ

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
Шифр, назва

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Назва

Виконав:

студент 2 курсу, група АКІТ_м-22-1



Підпис

Василь БОРТНІК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:

д-р техн. наук, проф.



Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер



Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

зав. кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих
технологій та робототехніки



Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

«21» грудня 2023 р.

Хмельницький 2023

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та
робототехніки

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня-професійна програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою АКІТ та Р

В. Мартинюк

« 01 » 09 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Бортнік Василь Вікторович

1 Тема роботи: Удосконалений метод керування електричним двигуном робота
керівник роботи Мартинюк Валерій Володимирович, д.т.н, професор.

Затверджено наказом по університету від «15» 08 2023р. № 30.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2023р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: розробка удосконаленого методу керування електричним двигуном
робота.





4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Математична модель
процесу керування електричним двигуном робота. Імітаційна модель
удосконаленого методу керування електричним двигуном робота.
Експериментальні дослідження удосконаленого методу керування електричним
двигуном робота. Висновки.

Завдання отримав _____

Науковий керівник _____

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Микола ФЕДУЛА, доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Людмила КОРЕЦЬКА, доц. кафедри АКІТтаР		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вступ	10.09.2023р.	Виконано
2	Огляд літературних джерел та патентних даних	25.09.2023р.	Виконано
3	Математична модель процесу керування електричним двигуном робота	15.10.2023р.	Виконано
4	Імітаційна модель удосконаленого методу керування електричним двигуном робота	30.10.2023р.	Виконано
5	Експериментальні дослідження удосконаленого методу керування електричним двигуном робота	10.11.2023р.	Виконано
6	Висновки	15.11.2023р.	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до ДР	20.11.2023р.	Виконано
7	Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2023р.	Виконано


Студент



Бортнік В.В.

Ініціали, прізвище

Керівник роботи



В. Мартинюк

Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалений метод керування електричним двигуном робота».

Автор роботи: Бортнік Василь Вікторович.

Керівник роботи: Мартинюк Валерій Володимирович.

Пояснювальна записка: 78 с., 60 рис., 2 табл., 1 дод., 40 джерел.

Графічна частина: 17 презентаційних слайдів.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ РОБОТА З ЯКОРЕМ І ПРЯМИМ ПРИВОДОМ НАВАНТАЖЕННЯ, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ РОБОТА.

Мета роботи: розробка удосконаленого методу керування електричним двигуном робота за допомогою ПД контролера та підвищення стабільності роботи двигуна.

10.12.2023р.

дата



підпис

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ.....	6
1.1. Особливості двигунів постійного струму.....	6
1.2. Особливості керування електричним двигуном робота	9
1.3 Висновки до першого розділу.....	16
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ РОБОТА	17
2.1 Математична модель двигуна постійного струму	17
2.2 Математична модель системи керування електричним двигуном робота....	21
2.3 Висновки до другого розділу	40
3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ РОБОТА	41
3.1 Дослідження імітаційної моделі двигуна постійного струму робота.....	41
3.2 Удосконалений метод керування електричним двигуном робота	48
3.3 Висновки до третього розділу.....	60
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ РОБОТА	61
4.1 Імітаційне моделювання удосконаленого методу керування електричним двигуном робота на основі ПД-регулятора.....	61
4.2 Результати імітаційного моделювання удосконаленого методу керування електричним двигуном робота на основі ПД-регулятора.....	69
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	73
ВИСНОВКИ.....	74
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	75
ДОДАТОК А Стаття у фаховому журналі	79

ВСТУП

Актуальність теми. Вибір приводного двигуна для використання в робототехніці є серйозним питанням і двигуни постійного струму мають певні можливості, які роблять їх бажаним вибором.

Двигун постійного струму перетворює електричну енергію постійного струму в механічну. Це відрізняється його від двигуна змінного струму, у якому на електродвигун подається змінний струм. На самому базовому рівні двигуни постійного струму добре працюють у робототехніці, оскільки вони дозволяють роботам працювати від батареї, що дає великі переваги для різноманітних робіт, особливо для мобільних і колаборативних робіт.

Вибір приводних двигунів вимагає спершу створити профіль роботи, щоб визначити його розмір, вагу, швидкість, середовище, в якому він працюватиме, а також шарнірні рухи, які він повинен виконувати. Усі ці фактори вплинуть на вибір приводного двигуна.

На додаток до можливості використання акумуляторів для полегшення мобільності, дві ключові особливості, які роблять двигуни постійного струму чудовими для робототехніки, це зміна швидкості та крутний момент.

Важливою особливістю двигуна постійного струму є те, що він може змінювати швидкість обертання в широкому діапазоні підвищення та пониження номінальної швидкості.

Існує три способи регулювання швидкості двигуна постійного струму. Оскільки швидкість двигуна прямо пропорційна напрузі живлення, то можна змінювати швидкість двигуна шляхом зміни напруги живлення.

Крім того, оскільки швидкість двигуна обернено пропорційна потоку через виводи поля, то змінюючи потік і струм через обмотку збудження, також можна змінювати швидкість двигуна.

Відомо також, що швидкість двигуна обернено пропорційна падінню напруги на якорі, тому можна змінювати швидкість двигуна шляхом зміни напруги та опору якоря.

Високий крутний момент є найбільшою перевагою використання двигунів постійного струму в робототехніці. Двигуни постійного струму здатні створювати високий пусковий момент, який використовується для переміщення важких вантажів у початкових положеннях і для додатків, що вимагають прискорення. Вони також здатні створювати постійний крутний момент на заданій швидкості, де потужність на валу змінюється залежно від швидкості.

Іншою перевагою є те, що двигуни постійного струму не містять реактивної потужності, тому немає додаткових вимог для вибору двигунів постійного для живлення навантаження. Крім того, на додаток до швидкого запуску та прискорення, двигуни постійного струму однаково корисні, коли потрібне швидке реверсування та зупинка.

Мета роботи – розробка удосконаленого методу керування електричним двигуном робота за допомогою ПД контролера та підвищення стабільності роботи двигуна.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити **завдання**:

- виконати огляд літературних джерел та патентних даних про методи керування електричним двигуном;
- розробити математичну модель процесу керування електричним двигуном;
- розробити імітаційну модель удосконаленого методу керування електричним двигуном робота;
- експериментальні дослідження удосконаленого методу керування електричним двигуном робота.

Наукова новизна одержаних результатів. У результаті проведеного дослідження:

Розроблено удосконаленого методу керування електричним двигуном робота за допомогою ПД контролера та підвищено стабільності роботи двигуна.

Об'єкт дослідження – процес керування електричним двигуном робота.

Предмет дослідження – удосконалений метод керування електричним

двигуном робота за допомогою ПД контролера та підвищення стабільності роботи двигуна.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ

1.1 Особливості двигунів постійного струму

Двигун постійного струму (ДПС) - це досить простий електричний двигун, який використовує електричне і магнітне поле для створення крутного моменту, що змушує його обертатися. У найпростішому випадку для його роботи потрібні два магніти протилежних полярностей та електрична котушка, яка діє як електромагніт.

Електромагнітні сили відштовхування і притягання магнітів створюють крутний момент, який змушує двигун обертатися. Двигун постійного струму використовує ці властивості для перетворення електрики в рух. Коли магніти всередині двигуна притягуються і відштовхуються один від одного, двигун обертається. Існують чотири типи двигунів постійного струму [1].

1. Двигуни постійного струму з постійними магнітами.

Двигуни постійного струму з постійними магнітами мають чудовий пусковий момент з хорошим регулюванням швидкості, але недоліком двигунів постійного струму з постійними магнітами є те, що вони обмежені у величині навантаження, яке вони можуть приводити в рух. Двигун постійного струму з постійними магнітами зображений на рисунку 1.1 [2].

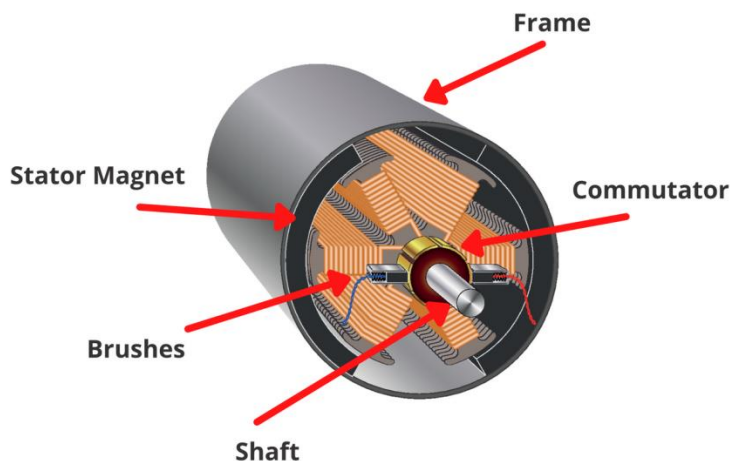


Рисунок 1.1 - Двигун постійного струму з постійними магнітами [2]

Двигуни постійного струму використовуються для навантаження малої потужності. Іншим недоліком є те, що крутний момент зазвичай обмежується 150% від номінального, щоб запобігти розмагнічуванню постійних магнітів [3].

2. Двигуни послідовного збудження.

У двигуні послідовного збудження обмотка збудження з'єднана послідовно з якорем. Обмотка збудження намотується кількома витками великого дроту, оскільки вона повинна нести повний струм якоря. На рисунку 1.2 зображено двигун послідовного збудження [4].

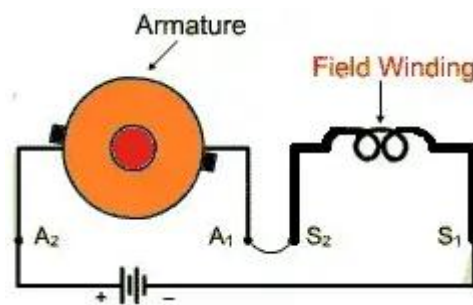


Рисунок 1.2 - Двигун послідовного збудження [4]

Характерною особливістю двигунів послідовного збудження є те, що двигун розвиває великий пусковий момент. Однак швидкість широко варіюється між холостим ходом і повним навантаженням. Двигуни послідовного збудження не можна використовувати там, де потрібна постійна швидкість при змінному навантаженні.

Крім того, швидкість послідовного двигуна без навантаження зростає до такої міри, що двигун може бути пошкоджений, тому до послідовно з'єднаного двигуна завжди повинно бути підключене певне навантаження. Послідовно з'єднані двигуни, як правило, не підходять для використання в більшості застосувань приводу зі змінною швидкістю [2].

3. Двигуни паралельного збудження.

У двигуні паралельного збудження обмотка збудження з'єднана паралельно з обмоткою якоря. Двигун паралельного збудження зображений на рисунку 1.3 [5].

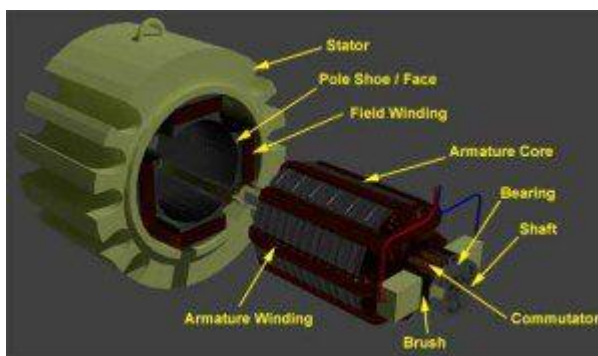


Рисунок 1.3 - Двигун паралельного збудження [5]

Двигун паралельного збудження забезпечує хороше регулювання швидкості, обмотка збудження може збуджуватися окремо або підключатися до того ж джерела, що і обмотка якоря.

Перевагою роздільного збудження обмотки збудження є здатність приводу зі змінною швидкістю забезпечувати незалежне керування якорем і обмоткою збудження, а двигун паралельного з'єднання використовує спрощене керування реверсом. Це особливо вигідно в рекуперативних приводах [2].

4. Двигуни змішаного збудження.

У двигуні змішаного збудження магнітний потік створюється двома обмотками: одна з'єднана послідовно з якорем, а друга паралельно з якорем. Двигун змішаного збудження зображений на рисунку 1.4 [4].

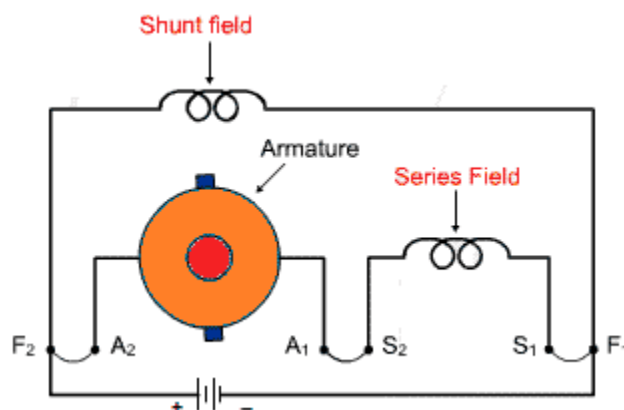


Рисунок 1.4 - Двигун змішаного збудження [6]

У двигуні змішаного збудження послідовне збудження забезпечує кращий пусковий момент, а паралельне збудження забезпечує краще регулювання швидкості. Однак послідовне збудження може спричинити проблеми з керуванням у додатках з регульованою швидкістю і, як правило, не використовується в чотириквadrантних приводах [3].

1.2 Особливості керування електричним двигуном робота

Регулювання швидкості означає зміну швидкості приводу до значення, необхідного для виконання конкретного робочого процесу. Поняття регулювання швидкості не повинно включати в себе природну зміну швидкості, яка відбувається через зміну навантаження на вал.

Будь-яке промислове обладнання може змінювати або регулювати швидкість механічно за допомогою ступінчастих шківів, наборів перемикаючих шестерень, механізму фрикційної муфти зі змінною швидкістю та інших механічних пристосувань.

Історично доведено, що це був перший крок у переході від нерегульованої швидкості до регульованого приводу. Електричне регулювання швидкості має багато економічних та інженерних переваг над механічним регулюванням швидкості.

Характер вимог до регулювання швидкості промислового приводу залежить від його типу. Деякі приводи можуть вимагати постійної зміни швидкості в усьому діапазоні від нуля до повної швидкості або в частині цього діапазону, тоді як інші можуть вимагати двох або більше фіксованих швидкостей [6].

Існує три основні способи регулювання швидкості в двигунах постійного струму [7].

1. Регулювання величиною магнітного потоку

Регулюючи магнітний потік в обмотці збудження можна змінювати швидкість двигуна. Магнітний потік залежить від струму, що протікає через

обмотку збудження. Магнітний потік змінюється шляхом зміни струму через обмотку збудження, використовуючи змінний резистор послідовно з обмоткою збудження у відповідності до рисунку 1.5 [8].

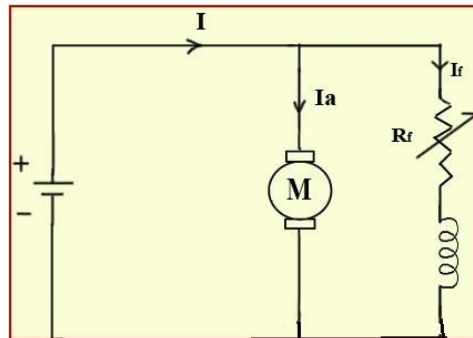


Рисунок 1.5 – Спосіб регулювання величиною магнітного потоку [8]

2. Регулювання опором якоря.

У способі регулювання опором якоря швидкість двигуна постійного струму прямо пропорційна зворотній ЕРС. Коли напруга живлення і опір якоря зберігаються постійними, швидкість прямо пропорційна струму якоря. Якщо ми додаємо опір послідовно з якорем, струм якоря зменшується, а отже, швидкість зменшується у відповідності до рисунку 1.6 [8].

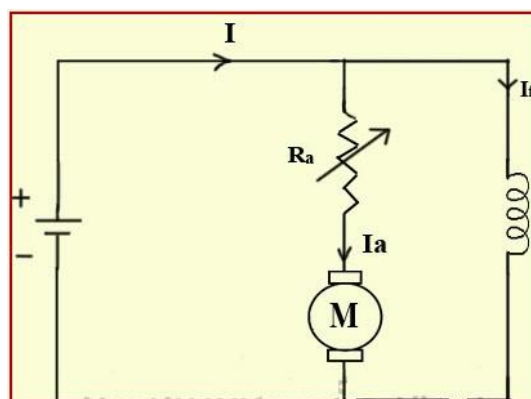


Рисунок 1.6 - Спосіб регулювання величиною опору якоря [8]

Цей спосіб здійснюється шляхом включення змінного опору послідовно з якорем.

3. Регулювання напругою.

Спосіб напругою передбачає використання механізму зміну напруги на якорі. Найбільш широко використовуваним є використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для досягнення регулювання швидкості двигуна постійного струму у відповідності до рисунку 1.7 [9].

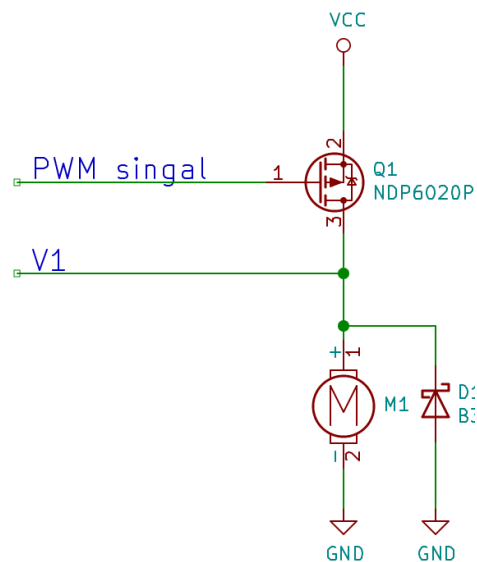


Рисунок 1.7 - Використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для досягнення регулювання швидкості двигуна постійного струму [9]

ШІМ передбачає застосування імпульсів різної тривалості до драйвера двигуна для керування напругою, що подається на двигун. Цей метод виявився дуже ефективним, оскільки втрати електроенергії зберігаються на мінімумі, і він не передбачає використання будь-якого складного обладнання.

Напруга, що подається на двигун, може змінюватися шляхом швидкого вмикання та вимикання напівпровідникового перемикача (наприклад, транзистора), при цьому напруга визначається тривалістю імпульсів вмикання та вимикання. Висока ефективність цього методу робить його найпоширенішим у наш час [10].

Керування за допомогою широтно-імпульсної модуляції працює шляхом дуже швидкого вмикання та вимикання живлення, що подається на двигун. Напруга постійного струму перетворюється на сигнал прямокутної форми, що

чергується між повним увімкненням і нулем, даючи двигуну серію "поштовхів" потужності.

Метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) - це метод керування швидкістю, який дозволяє вирішити проблему поганого запуску двигуна. ШІМ для регулювання швидкості двигуна працює дуже схожим чином.

Замість того, щоб подавати на двигун змінну напругу, на нього подається фіксоване значення напруги, яке негайно запускає його обертання. Потім напруга знімається, і двигун зупиняється. Продовжуючи цикл увімкнення/вимкнення напруги зі змінним робочим циклом, можна регулювати швидкість двигуна.

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) або методи зміни робочого циклу зазвичай використовуються для регулювання швидкості двигунів постійного струму. Робочий цикл визначається як відсоткове співвідношення цифрового "високого" рівня до цифрового "низького" рівня.

Основною причиною використання широтно-імпульсної модуляції для керування двигунами постійного струму є уникнення надмірного тепловиділення в лінійних підсилювачах потужності. Проблема розсіювання тепла часто призводить до використання великих радіаторів, а іноді і до примусового охолодження.

ШІМ-підсилювачі значно зменшують цю проблему завдяки значно вищій ефективності перетворення потужності. Крім того, вхідний сигнал на ШІМ-підсилювачі може бути безпосередньо отриманий від будь-якої цифрової системи без необхідності використання будь-яких ЦАП.

ШІМ-підсилювач потужності не позбавлений недоліків. Потрібний сигнал перетворюється не на амплітуду напруги, а на тривалість імпульсу (або робочий цикл). Очевидно, що це не лінійна операція. Але з деякими припущеннями, які зазвичай діють в управлінні двигуном, ШІМ можна наближено вважати лінійною (тобто, чистим підсиленням). Лінійна модель ШІМ-підсилювача базується на тому, що середня напруга дорівнює інтегралу від форми сигналу напруги.

Функція контролера швидкості двигуна постійного струму полягає в тому, щоб приймати на вході сигнал, що представляє необхідну швидкість, і керувати двигуном з цією швидкістю.

Контролер може вимірювати або не вимірювати швидкість двигуна, щоб використовувати її як зворотний зв'язок з метою зменшення похибки. Якщо він це робить, то система називається замкненим контуром, в іншому випадку - розімкненим контуром.

Швидкість обертання двигуна постійного струму в загальному випадку прямо пропорційна напрузі живлення, тому якщо зменшити напругу з 12 вольт до 6 вольт, то швидкість зменшиться вдвічі.

Але на практиці, щоб змінити швидкість двигуна постійного струму, ми не можемо весь час змінювати напругу живлення. Задача зміни швидкості двигуна при фіксованій вхідній напрузі, призвело до розробки систем, відомих як контролери швидкості.

Регулятор швидкості для двигуна постійного струму працює шляхом зміни середньої напруги, що подається на двигун (ШІМ є одним з таких регуляторів швидкості, де ми можемо отримати змінну напругу відповідно до робочого циклу вихідного сигналу ШІМ).

Замість того, щоб просто регулювати напругу, що подається на двигун, ми можемо вмикати та вимикати живлення двигуна, де перемикання відбувається настільки швидко, що двигун помічає лише середній ефект.

Регулювання швидкості двигуна постійного струму та керування двигунами постійного струму є фундаментальною проблемою. Потрібно отримати бажану швидкість і повний контроль над двигуном. Швидкість повинна регулюватися автоматично, але швидкість двигуна постійного струму завжди повинна контролюватися, а бажана швидкість повинна регулюватися.

Регулятори швидкості двигунів постійного струму здебільшого використовуються в багатьох промислових машинах. Це складне завдання, оскільки воно може впливати як на продуктивність, так і на перебіг процесу.

Тому важливо підтримувати швидкість на заданому рівні. У більшості галузей промисловості керування двигунами створює багато проблем через їхню нелінійну динамічну поведінку. Занадто висока швидкість може порушити рівновагу процесу, пошкодити обладнання або призвести до розливу небезпечних або цінних матеріалів.

Занадто низька швидкість може мати негативні наслідки для послідовних операцій, тому регулювання швидкості та керування двигунами постійного струму є важливим і поширеним елементом у досконалих технологічних процесах

Характеристики двигуна постійного струму представлені кривою крутний момент-швидкість, яка нахилена вниз праворуч, з крутним моментом як горизонтальною віссю, а швидкістю як вертикальною віссю у відповідності до рисунку 1.8 [10].

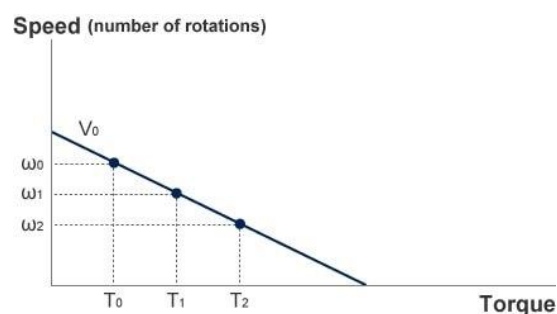


Рисунок 1.8 - Характеристика двигуна постійного струму [10]

Швидкість є найвищою, коли навантаження відсутнє, вона зменшується вправо, доки не буде досягнуто максимального крутного моменту на нульовій швидкості.

Крутний момент і швидкість змінюються залежно від навантаження, як показано на цій кривій крутний момент-швидкість. Розглянемо двигун, що обертається зі швидкістю ω_0 з крутним моментом T_0 . Якщо крутний момент навантаження збільшиться до T_1 , то швидкість двигуна слідуватиме крутному моменту до нової швидкості ω_1 . Подібним чином, якщо крутний момент навантаження далі збільшуватиметься до T_2 , швидкість падає до ω_2 .

У відповідності до співвідношення між крутним моментом і струмом впливає, що вони пропорційні один одному. Співвідношення між ними є постійним для двигуна, при цьому співвідношення залишається незмінним незалежно від змін швидкості двигуна або напруги приводу. Це означає, що для визначення крутного моменту двигуна достатньо самостійного вимірювання струму двигуна у відповідності до рисунку 1.9 [10].

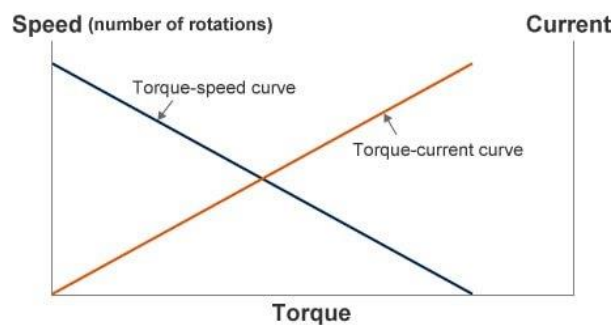


Рисунок 1.9 – Графік залежності швидкості обертання та струму двигуна від крутного моменту [10]

Крива крутний момент-швидкість двигуна постійного струму змінюється зі змінами напруги приводу. Це означає, що зміну швидкості двигуна можна досягти простим регулюванням напруги приводу. Дивлячись на графік, наведений на рисунку 1.10 [10], можна зробити висновок, якщо вимогою є обертання зі швидкістю ω_1 , коли крутний момент навантаження дорівнює T_0 , наприклад, напруга приводу V_4 занадто низька, що призводить до швидкості ω_2 .

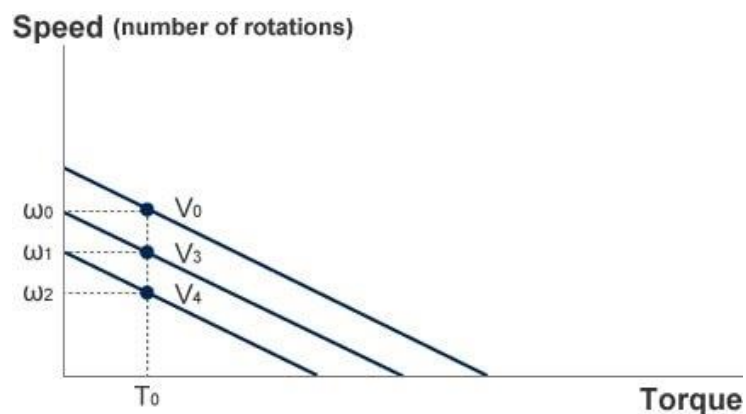


Рисунок 1.10 – Регулювання швидкості обертання двигуна зміною напруги [10]

Напруга приводу V_0 занадто висока, що призводить до швидкості ω_0 . Живлення двигуна проміжною напругою V_3 підходить для досягнення бажаної швидкості ω_1 .

1.3 Висновки до першого розділу

1. Двигун паралельного збудження забезпечує хороше регулювання швидкості, обмотка збудження може збуджуватися окремо або підключатися до того ж джерела, що і обмотка якоря.

2. Перевагою роздільного збудження обмотки збудження є здатність приводу зі змінною швидкістю забезпечувати незалежне керування якорем і обмоткою збудження, а двигун паралельного з'єднання використовує спрощене керування реверсом. Це особливо вигідно в рекуперативних приводах.

3. Основною причиною використання широтно-імпульсної модуляції для керування двигунами постійного струму є уникнення надмірного тепловиділення в лінійних підсилювачах потужності. Проблема розсіювання тепла часто призводить до використання великих радіаторів, а іноді і до примусового охолодження.

4. ШІМ-підсилювачі значно зменшують цю проблему завдяки значно вищій ефективності перетворення потужності. Крім того, вхідний сигнал на ШІМ-підсилювачі може бути безпосередньо отриманий від будь-якої цифрової системи без необхідності використання будь-яких ЦАП.

5. ШІМ-підсилювач потужності не позбавлений недоліків. Потрібний сигнал перетворюється не на амплітуду напруги, а на тривалість імпульсу (або робочий цикл). Очевидно, що це не лінійна операція. Але з деякими припущеннями, які зазвичай діють в управлінні двигуном, ШІМ можна наближено вважати лінійною (тобто, чистим підсиленням). Лінійна модель ШІМ-підсилювача базується на тому, що середня напруга дорівнює інтегралу від форми сигналу напруги.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ РОБОТА

2.1 Математична модель двигуна постійного струму

Реакція двигуна постійного струму залежить від його коефіцієнта підсилення постійного струму K і постійної часу t . Обидва K і t є функціями параметрів двигуна постійного струму. Метою цього розділу є моделювання двигуна постійного струму першого порядку та дослідження впливу параметрів двигуна постійного струму на його реакцію на ступінчастий вхідний сигнал.

Для керування електричним двигуном робота оберемо двигун постійного струму з якірним керуванням EMG30, який поводить себе як машина першого порядку, коли напруга на якорі є вхідним сигналом, а кутова швидкість – вихідним сигналом. Двигун постійного струму з якірним керуванням EMG30 зображено на рисунку 2.1. [11]



Рисунок 2.1 - Двигун постійного струму з якірним керуванням EMG30 [11]

Для того, щоб експериментально перевірити зміну реакції системи керування електричним двигуном робота, необхідно визначити передавальну функцію двигуна постійного струму. Також необхідно визначити конкретні параметри системи, які впливають на реакцію системи за допомогою ПД-регулятора.

Двигун постійного струму з якірним керуванням EMG30 - це привід, популярний у всьому світі в галузі мобільної робототехніки. Двигун постійного

струму з якірним керуванням EMG30 - це недорогий 12-вольтовий двигун, оснащений датчиками та редуктором 30:1.

Дуже важливо, що двигун постійного струму з якірним керуванням EMG30 оснащений датчиками, які надають дані для замкнутого контуру управління швидкістю і для отримання відносних вимірювань на основі розрахунку одометрії [12].

Одометрія (лат. вимірювання відстані) - є основним методом, який використовують роботи для навігації. Вимірювати час легко за допомогою внутрішнього годинника вбудованого комп'ютера. Вимірювати швидкість складніше: в деяких навчальних роботах кодери коліс використовуються для підрахунку обертів коліс, а в інших швидкість оцінюється за властивостями двигунів.

Математична модель двигуна постійного струму з якірним керуванням EMG30 описується рівнянням (2.1):

$$u_a(t) = e(t) + R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt}, \quad (2.1)$$

де $u_a(t)$ - вихідна напруга;

R_a - еквівалентний опір;

L_a - еквівалентна індуктивність;

$e(t)$ - зворотна ЕРС (електрорушійна сила);

$i_a(t)$ - струм двигуна.

Двигун може забезпечити крутний момент T_l , який буде прикладений до навантаження, як розвинутий крутний момент T_d від якого віднімається момент тертя, що є сумою статичного тертя T_c і в'язкого тертя $B\omega$, у відповідності до рівняння (2.2).

$$T_l = T_d - T_c - B\omega. \quad (2.2)$$

Струм i_a пов'язаний з розвиненим моментом T_d виразом (2.3):

$$T_d = k_s i_a. \quad (2.3)$$

Напруга зворотної ЕРС пов'язана з кутовою швидкістю виразом (2.4):

$$e = k_s \omega. \quad (2.4)$$

Момент навантаження T_l пов'язаний з моментом інерції та кутовим прискоренням виразом (2.5):

$$T_L = J \dot{\omega}. \quad (2.5)$$

На рисунку 2.2 зображено принципову схему двигуна постійного струму [13].

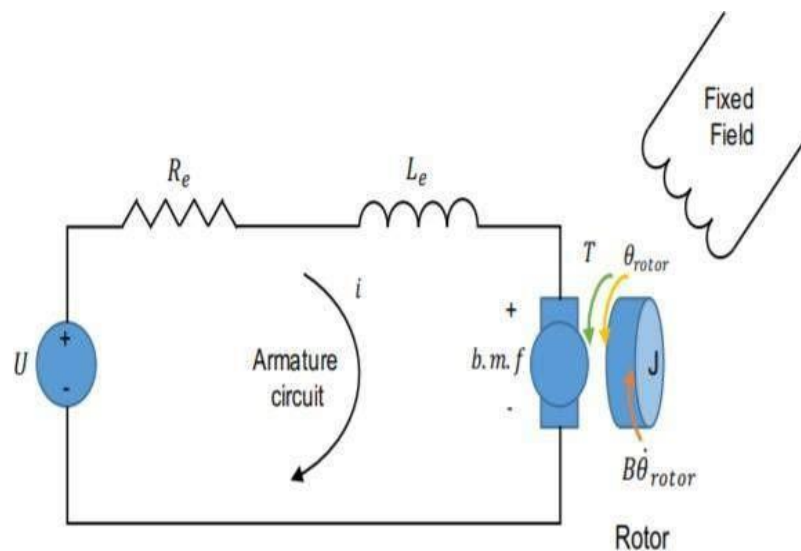


Рисунок 2.2 - Принципова схема двигуна постійного струму [13]

Аналізуючи рисунок 2.2 можна записати вираз моменту для двигуна постійного струму:

$$T_{xm} = J_m \cdot \frac{d\theta^2(t)}{dt} + B_m \cdot \frac{d\theta(t)}{dt}. \quad (2.6)$$

Звідси можна записати вираз передавальної функції схема двигуна постійного струму:

$$G(s) = \frac{\theta}{V} = \frac{K}{(Js+b)(Ls+Ra)+K^2}, \quad (2.7)$$

де V_a - напруга якоря;

R_a - опір якоря;

L_a - індуктивність якоря;

I_a - струм якоря;

E_b - зворотна ЕРС;

ω - кутова швидкість;

T_m - крутний момент двигуна;

θ - кутове положення валу ротора;

J_m - інерція ротора;

B_m - коефіцієнт в'язкого тертя;

K_t - константа крутного моменту;

K_b - константа зворотної ЕРС.

Технічні характеристики та параметри двигуна постійного струму EMG30 наведені в таблиці 2.1 [12].

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики та параметри двигуна постійного струму EMG30 [12]

Параметри	Значення
R_a	7,101 Ом
L_a	0,00019 Н
K_b	0,360 Вc/рад
J_m	0,0034 кг·м ²
B_m	0,000600 Нм/рад

2.2 Математична модель системи керування електричним двигуном робота

Система керування - це засіб, за допомогою якого будь-яка величина, що цікавить нас у машині, механізмі чи іншому обладнанні, підтримується відповідно до бажаного режиму. Всі наші інструменти та машини потребують відповідного контролю для роботи, інакше буде важко точно виконати призначені їм завдання.

Тому нам потрібні системи керування, щоб спрямовувати, інструктувати і регулювати наші інструменти та машини. До поширених систем керування належать механічні, електронні, пневматичні та комп'ютерні. Пристрій або процес, яким потрібно керувати, на структурній схемі керування зображають блоком у відповідності до рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 - Структурна схема керування

Існує два типи систем керування: розімкнута система та замкнута система. Ці дві системи можуть бути представлені блок-схемами.

1. Розімкнута система керування.

Будь-яка фізична система, яка не коригує автоматично зміну свого виходу, називається розімкненою системою. Структурна схема розімкнутої системи керування зображена на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 - Структурна схема розімкнутої системи керування

У таких системах вихід залишається постійним для постійного вхідного сигналу за умови, що зовнішні умови залишаються незмінними.

Вихід може бути змінений на будь-яке бажане значення, приблизно змінюючи вхідний сигнал, але варіації зовнішніх умов можуть призвести до неконтрольованого відхилення вихідної величини від бажаного значення. Прикладами розімкнутих систем керування є пральні машини, вимикачі світла, газу тощо.

Розімкнута система керування може протидіяти лише тим збуренням, для яких він був розроблений, інші збурення не можуть бути усунені. Розімкнута система керування не може стати нестабільною - доки об'єкт керування є стабільним.

2. Замкнута система керування.

Зворотний зв'язок - це особливість замкненої системи керування. Система керування зі зворотним зв'язком порівнює вихідний сигнал з очікуваним результатом або станом команди, а потім виконує відповідні керуючі дії для коригування вхідного сигналу. Структурна схема замкнутої системи керування зображена на рисунку 2.5.

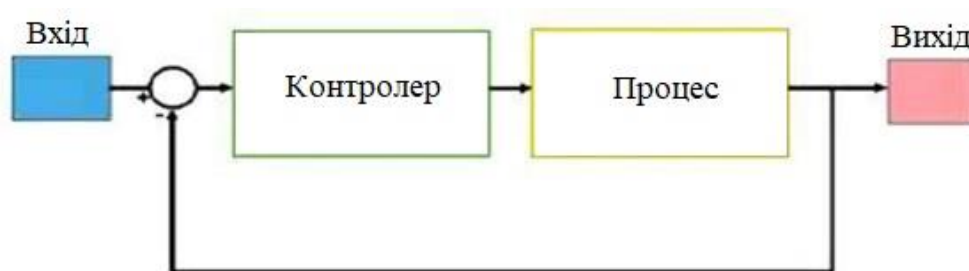


Рисунок 2.5 - Структурна схема замкнутої системи керування

Тому в замкненій системі завжди є датчик, який використовується для моніторингу вихідного сигналу і порівняння його з очікуваним результатом. Вихідний сигнал подається назад на вхід для отримання нового результату. Добре спроектована система зворотного зв'язку часто може підвищити точність вихідного сигналу.

Зворотний зв'язок можна розділити на додатній і від'ємний. Додатній зворотний зв'язок змушує новий вихідний сигнал відхилятися від поточного стану команди. Від'ємний зворотний зв'язок спрямовує новий вихідний сигнал до поточного стану команди, щоб дозволити більш складні управління. Більшість сучасних приладів та механізмів оснащені системами керування із замкнутим контуром. Прикладами є кондиціонери, холодильники тощо.

Замкнута система керування може протидіяти збуренням, але може стати нестабільною, тобто контрольована змінна не зникає, а зростає (теоретично) до нескінченного значення.

У розімкненому контурі керування двигуном постійного струму вихід (швидкість двигуна) не може підтримуватися на бажаному значенні через зовнішні збурення та системні змінні, тоді як у замкненому контурі вихід може підтримуватися завдяки наявності кола зворотного зв'язку.

Коло зворотного зв'язку здійснює вибірку вихідного сигналу і подає сигнали на детектор помилок, який порівнює сигнал зворотного зв'язку із заданим значенням і виробляє модифікований сигнал відповідно до вихідного.

Регулювання швидкості двигуна постійного струму та керування двигунами постійного струму є фундаментальною проблемою. Потрібно отримати бажану швидкість і повний контроль над двигуном. Швидкість повинна регулюватися автоматично, але швидкість двигуна постійного струму завжди повинна контролюватися, а бажана швидкість повинна регулюватися.

Регулятори швидкості двигунів постійного струму здебільшого використовуються в багатьох промислових машинах. Це складне завдання, оскільки воно може впливати як на продуктивність, так і на перебіг процесу. Тому важливо підтримувати швидкість на заданому рівні.

У більшості галузей промисловості керування двигунами створює багато проблем через їхню нелінійну динамічну поведінку. Занадто висока швидкість може порушити рівновагу процесу, пошкодити обладнання або призвести до розливу небезпечних або цінних матеріалів.

Занадто низька швидкість може мати негативні наслідки для послідовних операцій, тому регулювання швидкості та керування двигунами постійного струму є важливим і поширеним елементом у досконалих технологічних процесах. Структурна схема керування двигуном постійного струму зображена на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 - Структурна схема керування двигуном постійного струму робота

Добре розроблена система автоматичного керування зменшує вплив зовнішніх збурень системи для фіксованого заданого значення. Типовим прикладом системи керування, яка реагує на зовнішні перешкоди, є круїз-контроль, який є в автомобілях. Водій встановлює крейсерську швидкість, а контролер реагує на зміни дорожніх умов, щоб підтримувати це бажане значення.

На рисунку 2.7 показано двигун постійного струму, що приводиться в дію регульованим джерелом живлення постійного струму, що регулює кутове положення.

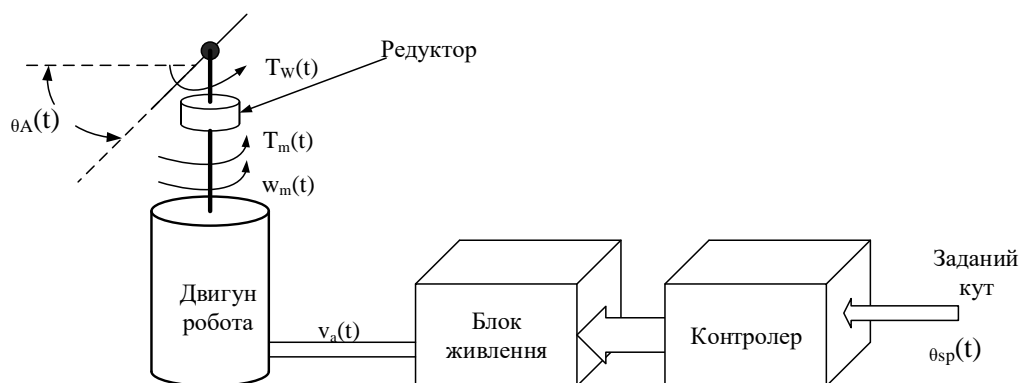


Рисунок 2.7 – Система позиціонування із зовнішньою задавою

Бажане кутове положення як функція часу визначається як $\theta_A(t)$. Завада створює крутний момент на позиціонуючому валу, який відображається на валу двигуна через коробку передач, що знижує швидкість. Цей редуктор зменшує швидкість двигуна та збільшує крутний момент двигуна, дозволяючи двигуну ефективно використовувати вихідну механічну потужність для позиціонування.

Регульоване джерело живлення постійного струму високої потужності регулює напругу якоря двигунів, що, у свою чергу, змінює положення вихідного вала через коробку передач.

Автоматичний контролер приймає задане положення, $\theta_{sp}(t)$ як вхідний сигнал. Зазвичай це константа відносно часу, але може бути лінійною функцією для програми відстеження.

Розглянемо математичну модель системи позиціонування двигуна постійного струму. Цей привід системи керування є двигуном постійного струму з постійним магнітом, керованим якорем. На рисунку 2.8 показана динамічна модель двигуна, керованого якорем. Ця модель передбачає, що двигун приводить в рух механічне навантаження безпосередньо від свого вала.

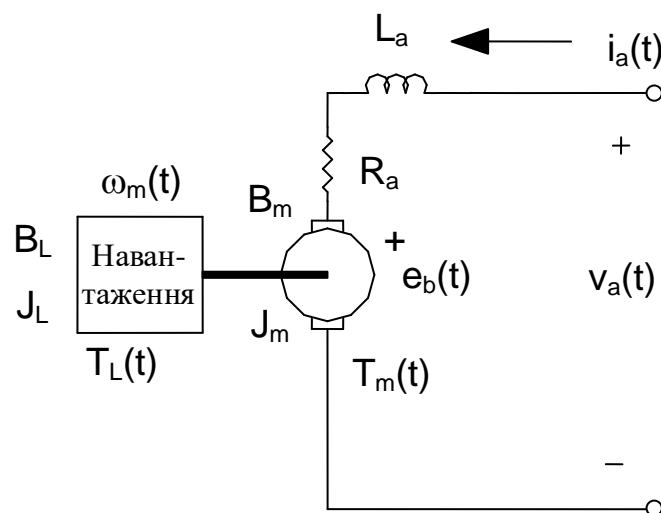


Рисунок 2.8 – Математична модель двигуна постійного струму з якорем і прямим приводом навантаження

Параметри математичної моделі двигуна постійного струму з якорем і прямим приводом навантаження наступні:

$v_a(t)$ - напруга якоря;

$i_a(t)$ - струм якоря;

$e_b(t)$ - зворотна ЕРС двигуна;

$T_m(t)$ - крутний момент двигуна;

$\omega_m(t)$ - швидкість вала двигуна;

$T_L(t)$ - момент механічного навантаження;

R_a - опір арматури;

L_a - індуктивність якоря;

B_m - в'язке тертя двигуна;

B_L - навантаження в'язкого тертя;

J_m - інерція обертання двигуна;

J_L - обертальна інерція навантаження.

Це представлення вимагає ще двох параметрів для завершення моделі. Ці параметри наступні:

K_e - постійна зворотна ЕРС;

K_T - константа крутного моменту.

При використанні одиниць СІ числові значення K_e і K_T рівні. Система рівнянь (2.8) представляє динамічну реакцію швидкості двигуна на зміни напруги якоря.

$$\begin{cases} \frac{di_m(t)}{dt} = -\left(\frac{R_a}{L_a}\right) \cdot i_a(t) - \left(\frac{K_e}{L_a}\right) \cdot \omega_m(t) + \frac{v_a(t)}{L_a} \\ \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \left(\frac{K_T}{J_m + J_L}\right) \cdot i_a(t) - \left(\frac{(B_m + B_L)}{(J_m + J_L)}\right) \cdot \omega_m(t) - \frac{T_L(t)}{(J_m + J_L)} \end{cases} \quad (2.8)$$

У цих рівняннях струм якоря двигуна та швидкість повністю визначають реакцію двигуна на навантаження. Напруга якоря та крутний момент навантаження є входами системи.

Розв'язок цієї системи диференціальних рівнянь, які в теорії систем керування називають рівняннями стану, дає графіки струму якоря двигуна та швидкості в залежності від часу.

Перше рівняння системи описує електричну динаміку двигуна постійного струму та включає індуктивну постійну часу, яка обмежує швидкість, з якою струм може змінюватися в якорі двигуна. Simulink використовує рівняння в цій формі, модифіковані для чисельного інтегрування в комп'ютері, для створення графіків відгуків.

Друге рівняння системи описує механічну динаміку. Це рівняння містить механічну постійну часу, представлену відношенням загального в'язкого демпфування (B_m+B_L) до повної обертової інерції (J_m+J_L). Це співвідношення визначає, наскільки швидко може змінюватися швидкість двигуна/навантаження.

Систему рівнянь (2.8) можна перетворити, використовуючи вирази (2.9) і (2.10), в результаті отримуючи систему рівнянь (2.11).

$$T_m(t) = K_T \cdot i_m(t), \quad (2.9)$$

$$e_b(t) = K_e \cdot \omega_m(t), \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} v_a(t) - e_b(t) = L_a \frac{di_m(t)}{dt} + i_a(t) \cdot R_a \\ T_m(t) = (J_m + J_L) \frac{d\omega_m(t)}{dt} + (B_m + B_L) \cdot \omega_m(t) + T_L(t) \end{cases} \quad (2.11)$$

В результаті перетворення Лапласа рівнянь (2.9 - 2.11) отримаємо рівняння (2.12 - 2.15).

$$T_m(s) = K_T \cdot I_m(s), \quad (2.12)$$

$$E_b(s) = K_e \cdot \omega_m(s), \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} I_a(s) = \left[\frac{1}{L_a s + R_a} \right] \cdot (V_a(s) - E_b(s)) \\ \Omega_m(s) = \left[\frac{1}{J_{eq} s + B_{eq}} \right] \cdot (T_m(s) - T_L(s)) \end{cases}, \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} J_{eq} = (J_m + J_L) \\ B_{eq} = (B_m + B_L) \end{cases}, \quad (2.15)$$

Ці рівняння утворюють взаємозв'язки вводу/виводу, які використовуються для створення блок-схеми, яка показана на рисунку (2.9).

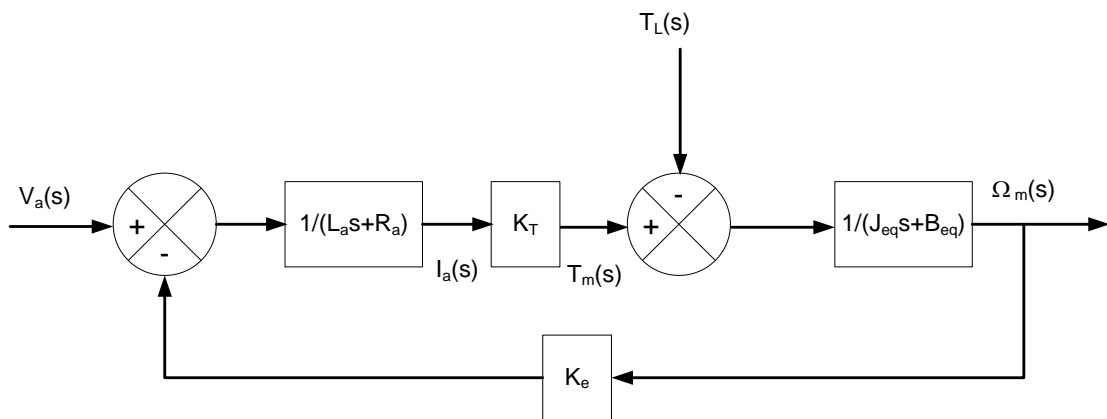


Рисунок 2.9 - Блок-схема двигуна постійного струму, керованого якорем, із прямим зв'язаним навантаженням

На рисунку 2.9 показано, що різниця між напругою якоря та зворотною ЕРС створює різницю напруг, яка визначає струм якоря. Значення L_a і R_a визначають величину і швидкість зміни цього струму.

Константа крутного моменту перетворює струм якоря в крутний момент двигуна. Крутний момент створює швидкість вала двигуна через механічну динаміку. Загальне в'язке тертя обмежує швидкість двигуна, тоді як загальна інерція обертання визначає швидкість зміни швидкості.

Цей контролер контролює положення вала двигуна, тому положення вала двигуна повинно бути пов'язане зі швидкістю двигуна. Рівняння (2.16) використовує швидкість зміни положення вала для вираження швидкості двигуна.

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m(t), \quad (2.16)$$

де θ_m - положення вала двигуна.

Це рівняння показує, що інтегрування швидкості вала двигуна дасть положення вала двигуна. Далі замінимо рисунок 2.9, щоб визначити положення вала двигуна, додавши інтегрування до його вихідного сигналу. Інтегрування в області Лапласа – це ділення на змінну Лапласа s . На рисунку 2.10 показана модель двигуна для вхідної напруги якоря та виходу положення вала.

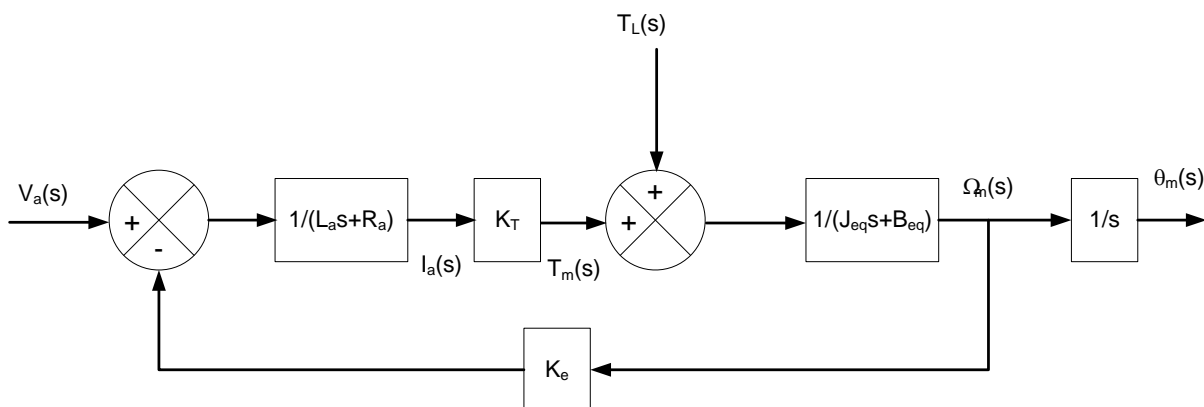


Рисунок 2.10 - Модель двигуна для вхідної напруги якоря та виходу положення вала

Рівняння (2.17) описує рівняння стану для двигуна постійного струму з позиційним вихідним сигналом для безпосередньо підключеного механічного навантаження.

$$\begin{cases} \frac{di_m(t)}{dt} = -\left(\frac{R_a}{L_a}\right) \cdot i_a(t) - \left(\frac{K_e}{L_a}\right) \cdot \omega_m(t) + \frac{v_a(t)}{L_a} \\ \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \left(\frac{K_T}{(J_m + J_L)}\right) \cdot i_a(t) - \left(\frac{(B_m + B_L)}{(J_m + J_L)}\right) \cdot \omega_m(t) - \frac{T_L(t)}{(J_m + J_L)} \\ \frac{d\theta_m(t)}{dt} = \omega_m(t) \end{cases} \quad (2.17)$$

У більшості випадків електрична постійна часу, задана як $\tau_e=L_a/R_a$, набагато менша, ніж механічна постійна часу $\tau_m=J_m/B_m$. Це спрощує передавальну функцію і зменшує складність математичної моделі. Якщо відношення постійних часу $\tau_m/\tau_e \geq 100$, використовується модель зменшеного порядку, яка задається рівняннями (2.18).

$$\begin{aligned} \frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} &= \frac{K_s}{1 + \tau_s \cdot s} \\ K_s &= \frac{K_T}{R_a \cdot B_m + K_E \cdot K_T} \\ \tau_s &= \frac{R_a \cdot J_m}{R_a \cdot B_m + K_E \cdot K_T} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Зменшена модель усуває вузол додавання крутного моменту, показаний на рисунку 2.10. Збурення швидкості тепер має представляти збурення крутного моменту. На рисунку 2.11 показана блок-схема для моделі двигуна зменшеного порядку, яка має вхід зовнішніх збурень.

Механічна динаміка, обумовлена амортизацією та інерцією обертання зовнішньої системи, перетворює збурення крутного моменту на відповідне збурення швидкості. Ця версія моделі навантаження двигуна відокремлює параметри механічного навантаження від електричних параметрів двигуна. Інерція обертання навантаження та в'язке тертя є параметрами, які перетворюють крутний момент навантаження в швидкість навантаження.

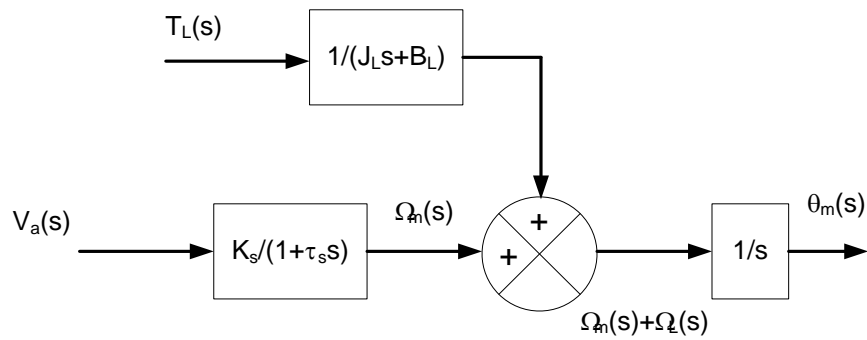


Рисунок 2.11 - Модель двигуна зменшеного порядку

Отримана швидкість навантаження двигуна викликає зміну положення після інтегрування.

Зниження порядку також усуває внутрішню петлю зворотного зв'язку між внутрішньою напругою генератора та напругою на клемі, яка контролює струм якоря. Блок-схема показує напругу якоря двигуна, що контролює швидкість двигуна безпосередньо через блок першого порядку.

Привід двигуна підключається до актуатора через систему редуктора швидкості. Передавальне число змінює значення швидкості та крутного моменту, створювані на валу двигуна. Це співвідношення також змінює величину в'язкого тертя та обертальну інерцію, які прикладені до вала двигуна.

На рисунку 2.12 показано представлення простого зубчастого приводу, що складається з двох передач. Механічне джерело живлення забезпечує швидкість ω_1 і крутний момент T_1 . На виході присутня швидкість ω_2 і крутний момент T_2 .

Привід переміщує вхідну шестерню на θ_1 радіан, тоді як вихідну шестерню переміщує на відстань θ_2 радіан. Радіус кожної шестерні визначає кутові відстані, які кожна шестерня долає за одиницю часу.

Це також визначає кутову швидкість. Шестерні не можуть ковзати, тому відстань, яку покриває ведена шестерня, має дорівнювати відстані, яку покриває вихідна шестерня. Наступне рівняння визначає довжину дуги, пройденої за одиницю часу, виражену радіусом шестерні.

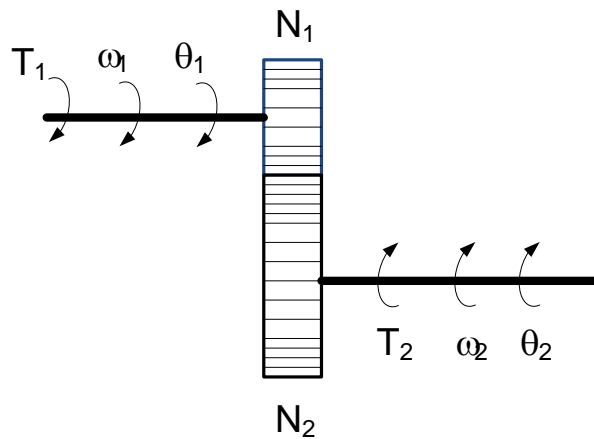


Рисунок 2.12 - Визначення швидкості, крутного моменту та положення для передач

$$\frac{d\theta_1}{dt} \cdot r_1 = \frac{d\theta_2}{dt} \cdot r_2, \quad (2.19)$$

де r_1 - радіус веденої шестерні;

r_2 - радіус вихідної шестерні.

Похідна від кутового переміщення є кутовою швидкістю в радіанах/секунду. Крім того, кількість зубів у шестерні пропорційна радіусу.

Виконання цих заміन дає наступні вирази для зміни швидкості.

$$\omega_1 \cdot N_1 = \omega_2 \cdot N_2, \quad (2.20)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N_2}{N_1}, \quad (2.21)$$

де N_1 - кількість зубів у веденій шестерні;

N_2 - кількість зубів у вихідній шестерні;

ω_1 - швидкість руху;

ω_2 - вихідна швидкість.

Положення вала вихідного редуктора відповідає подібним співвідношенням.

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{N_2}{N_1}, \quad (2.22)$$

де θ_1 - положення приводного валу;

θ_2 - положення вихідного вала.

Коефіцієнт крутного моменту є обернено пропорційний відносно швидкостей. Коли вихідна швидкість зменшується, вихідний крутний момент збільшується для фіксованої вхідної механічної потужності. Це підтримує механічний баланс потужності в коробці передач, припускаючи відсутність тертя чи інших втрат.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{N_2}{N_1}, \quad (2.23)$$

де T_2 - вихідний момент;

T_1 - момент приводу.

Коробки передач змінюють значення в'язкого тертя та інерції обертання, які спостерігаються під впливом навантажень і механічних джерел енергії. На рисунку 2.13 зображено типову механічну систему зі значеннями в'язкого тертя B_1 і B_2 та моментами обертальної інерції J_1 і J_2 , з'єднаними через коробку передач із ведучими зубцями N_1 і вихідними зубцями N_2 . Передавальне число змінює значення механічного вихідного в'язкого тертя та обертальної інерції за такими формулами.

Параметри J_{eqd} і B_{eqd} відображають загальну еквівалентну обертальну інерцію та в'язке тертя, що спостерігаються з боку приводу коробки передач.

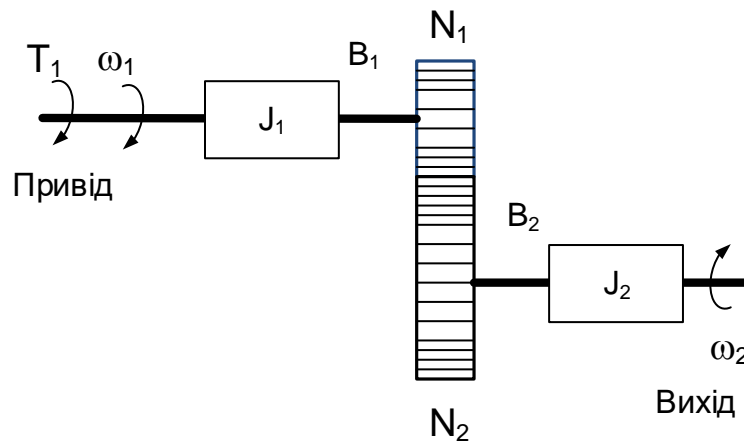


Рисунок 2.13 - Коробка передач, інерція механічного навантаження та в'язке тертя

Передавальне число може змінювати крутний момент, швидкість і положення вихідного вала на основі рівнянь (2.20) - (2.23). Наступні рівняння визначають крутний момент вихідної швидкості та положення в термінах змінних приводу.

$$\begin{cases} \omega_1 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = \omega_2 \\ \theta_1 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = \theta_2 \\ T_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) = T_2 \end{cases} \quad (2.24)$$

Коли вихідні значення відомі, розв'яжемо наведені вище рівняння для значень ω_1 , θ_1 і T_1 , щоб отримати еквівалентну швидкість, положення та крутний момент на стороні приводу коробки передач.

Ідеальний редуктор аналогічний ідеальному електричному трансформатору. Механічна потужність однакова з обох сторін коробки передач. Передавальне число зменшує швидкість, але збільшує крутний момент для підтримки балансу потужності з обох сторін пристрою.

Параметри в'язкого тертя та інерції відбиваються через коробку передач шляхом множення на квадрат передавального числа, якщо дивитися з боку приводу пристрою. Ці параметри діляться на квадрат передавального числа, коли всі величини відносяться до вихідної сторони коробки передач.

На рисунку 2.14 показане коло від'ємного зворотного зв'язку, яке необхідне для генерації сигналу помилки положення антени. Датчик положення відстежує положення валу та може підсилювати вихідний сигнал для правильного масштабування для порівняння з сигналом положення заданої точки.

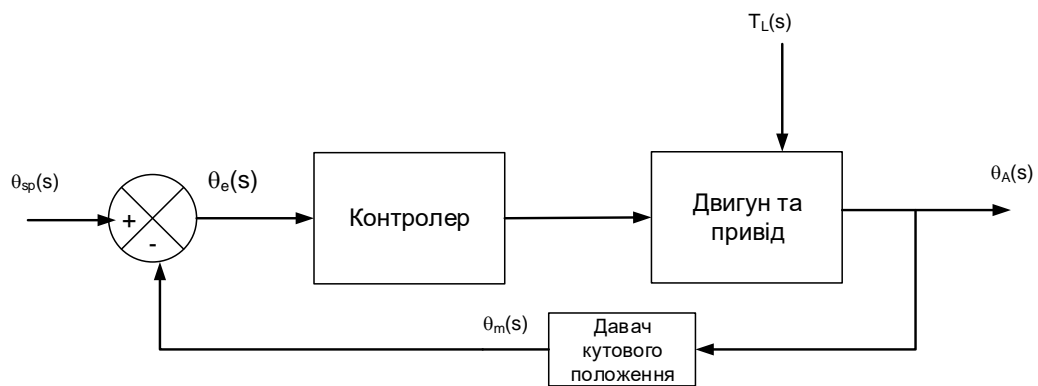


Рисунок 2.14 - Розпізнавання кутового положення та генерація помилок

Вихідний сигнал подається на блок віднімання, який порівнює виміряне значення положення з бажаним значенням. Наведене нижче алгебраїчне рівняння описує цей процес.

$$K_s \cdot (\theta_{sp}(s) - \theta_m(s)) = \theta_e(s), \quad (2.25)$$

де K_s - підсилення датчика (може бути 1,0 для спрощення моделі);

$\theta_{sp}(s)$ - задане значення кута вала;

$\theta_m(s)$ - виміряне значення кута вала

$\theta_e(s)$ = кутова похибка.

Коли $K_s=1$ вихід датчика становить $\theta_m(s)=\theta_A(s)$, виміряне значення дорівнює фактичному положенню вала. Кут помилки забезпечує вхідний сигнал

для контролера, який потім вироблятиме сигнал корекції для двигуна/приводу постійного струму.

Існують три режими керування для зміни сигналу помилки контролера від'ємного зворотного зв'язку.

1. Пропорційний режим (П).
2. Інтегральний режим (І).
3. Диференційний режим (Д).

Комбінування цих режимів дає кілька комбінацій реакції керування з різними характеристиками. Зазвичай зустрічаються комбіновані режими: ПІ, ПД і ПІД керування.

Регулювання констант, пов'язаних із цими комбінаціями, «налаштовує» контролер і змінює реакцію системи. Режим пропорційного керування приймає вхідний сигнал помилки та підсилює його на константу.

Використання цього режиму керування може призвести до великих коефіцієнтів підсилення для досягнення прийнятної стаціонарної помилки, що може призвести до нестабільної системи. Режим інтегрального керування підсумовує сигнал помилки за час і може з часом звести похибку сталого стану системи до нуля.

Режим похідного керування не можна використовувати окремо, оскільки він створює та виводить лише коли змінюється вхідна помилка. Режим похідної створює сигнал корекції на основі швидкості зміни помилки. Це створює випереджувальну дію, яка може покращити стабільність системи.

На рисунку 2.15 показано, як моделювати П та ПІ контролер у Simulink.

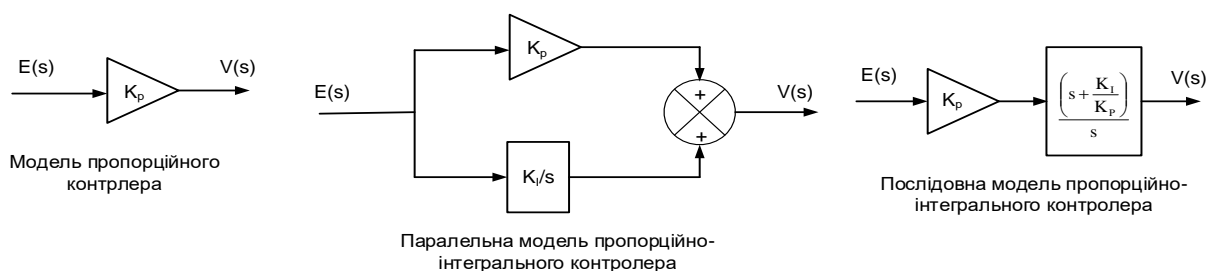


Рисунок 2.15 – Моделі контролерів

У цих моделях:

1. K_P - пропорційне підсилення.
2. K_I - інтегральне посилення.
3. s - змінною Лапласа.

На рисунку 2.15 показано два варіанти реалізації ПІ-регулятора як моделі блок-схеми. Перша модель ПІ-регулятора використовує паралельне з'єднання для об'єднання дій П та І, тоді як друга модель показує алгебраїчно зменшену версію з використанням двох каскадних блоків.

ПІ-регулятор вводить в систему один полюс, розташований як $s=0$, і нуль при $s=-K_I/K_P$. Регулювання значень K_P і K_I змінює реакцію системи та усуває помилку сталого стану. У системах, які вже містять інтегратор, додавання полюса на нуль зменшує помилку відстеження до нуля.

Система контролера вала включає в себе додатну функцію перетворення швидкості вала двигуна в положення вала. Використання РІ-регулятора має давати нульову помилку відстеження після деякої затримки.

Одна з переваг використання від'ємного зворотного зв'язку полягає в тому, що керована система прагне повернутися до бажаного значення після дії на вихідний сигнал зовнішнього збурення.

На рисунку 2.16 показана блок-схема системи із збуренням, яке вводиться на вихід контролера.

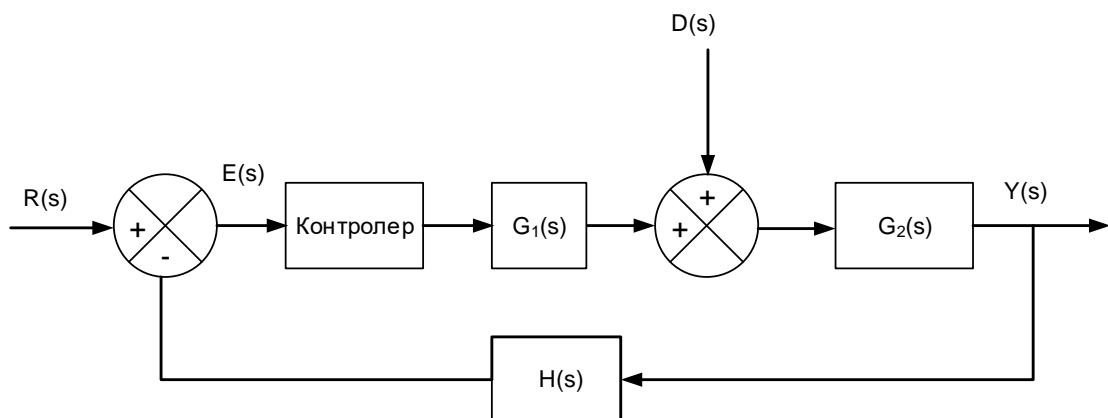


Рисунок 2.16 - Блок-схема системи із збуренням

Зовнішнє збурення $D(s)$ діє на вихідний сигнал системи $Y(s)$, щоб перемістити систему від стабільного значення, визначеного заданим значенням системи $R(s)$. Загальна відповідь поєднує в собі вплив обох входів на систему.

Суперпозиція знаходить загальний вихід системи, приймаючи $R(s)$ і $D(s)$ як окремі входи, а інший вхід встановлено на нуль. Оцінка результуючої блок-схеми для кожного окремого вхідного сигналу з іншим входом, встановленим на нуль, дає вихідний відгук, створений кожним входом. Сума двох виходів дає загальну реакцію системи як на збурення, так і на задане значення.

Рівняння (2.26) показує, як задане значення та сигнали збурень впливають на загальну вихідну потужність для пропорційного регулятора з підсиленням K_p .

$$Y(s) = \left[\frac{K_p \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)}{1 + K_p \cdot G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot H(s)} \right] \cdot R(s) + \left[\frac{G_1(s)}{1 + K_p \cdot G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot H(s)} \right] \cdot D(s). \quad (2.26)$$

Це рівняння показує, що якщо значення $K_p \gg 1$, то коефіцієнт множення $R(s)$ наближається до одиниці. Це означає, що вихідні дані відстежуватимуть вхідні дані без помилки в стаціонарному стані. Другий член показує, що для пропорційного підсилення величина збурення зменшується, коли значення K_p стає дуже великим.

Рівняння (2.27) показує таке ж співвідношення, як (2.26), тільки з використанням пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора. ПІ-регулятор додає полюс при $s=0$ і нуль при $s=-K_I/K_p$.

$$Y(s) = \left[\frac{K_p \cdot (s + \alpha) \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)}{s + GH(s)} \right] \cdot R(s) + \left[\frac{s \cdot G_1(s)}{s + GH(s)} \right] \cdot D(s), \quad (2.27)$$

$$GH(s) = K_p \cdot (s + \alpha) \cdot G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot H(s), \quad (2.28)$$

$$\alpha = K_I / K_p. \quad (2.29)$$

Рівняння (2.27) має два параметри: K_p і K_I , які керують реакцією системи. Встановлення нуля ПІ-регулятора, який є параметром $\alpha=K_I/K_p$, на значення, менше ніж домінуючий полюс системи з відкритим контуром, змінює продуктивність системи.

Домінуючим полюсом є корінь полінома знаменника передавальної функції з найменшим числовим значенням, який є найдовшою сталою часу. Це скасовує деякі ефекти домінуючого полюса та може збільшити швидкість реакції системи.

Встановлення значення нуля регулятора точно на значенні домінуючого полюса в цьому випадку змушує систему коливатися для всіх значень K_p . Встановлення нульового значення більшим за домінуючий полюс призводить до нестабільності виходу. Цей аналіз передбачає, що збурення дорівнює нулю.

Усі корені характеристичного рівняння повинні мати дійсні частини для стабільності системи. Характеристичне рівняння для ПІ-регулятора задається формулою:

$$s + K_p \cdot (s + \alpha) \cdot G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot H(s) = 0. \quad (2.30)$$

Підтримка постійного α під час регулювання K_p вимагає зміни K_I . Для фіксованого нульового розташування α це співвідношення виконується.

$$K_I = \alpha \cdot K_p. \quad (2.31)$$

Для ПІ-регулятора вибір значення α і K_p регулює реакцію системи. Як тільки буде знайдено стабільне значення α , значення K_p коригується для покращення продуктивності керування.

2.3 Висновки до другого розділу

1. Реакція двигуна постійного струму залежить від його коефіцієнта підсилення постійного струму K і постійної часу t . Обидва K і t є функціями параметрів двигуна постійного струму.

2. Для керування електричним двигуном робота оберемо двигун постійного струму з якірним керуванням EMG30, який поводить ся як машина першого порядку, коли напруга на якорі є вхідним сигналом, а кутова швидкість – вихідним сигналом.

3. Дуже важливо, що двигун постійного струму з якірним керуванням EMG30 оснащений датчиками, які надають дані для замкнутого контуру управління швидкістю і для отримання відносних вимірювань на основі розрахунку одометрії.

4. Замкнута система керування може протидіяти збуренням, але може стати нестабільною, тобто контрольована змінна не зникає, а зростає (теоретично) до нескінченного значення.

5. У розімкненому контурі керування двигуном постійного струму вихід (швидкість двигуна) не може підтримуватися на бажаному значенні через зовнішні збурення та системні змінні, тоді як у замкненому контурі вихід може підтримуватися завдяки наявності кола зворотного зв'язку.

6. Занадто низька швидкість може мати негативні наслідки для послідовних операцій, тому регулювання швидкості та керування двигунами постійного струму є важливим і поширеним елементом у досконалих технологічних процесах.

7. Привід двигуна підключається до актуатора через систему редуктора швидкості. Передавальне число змінює значення швидкості та крутного моменту, створювані на валу двигуна. Це співвідношення також змінює величину в'язкого тертя та обертальну інерцію, які прикладені до вала двигуна.

3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ РОБОТА

3.1 Дослідження імітаційної моделі двигуна постійного струму робота

Дослідження імітаційної моделі двигуна постійного струму робота виконано в середовищі MATLAB/SIMULINK із використанням бібліотеки Simscape. Використаємо стандартний блок DC Motor, який знаходиться в бібліотеці Simscape/Electrical/Electromechanical/Brushed Motors, і зображений на рисунку 3.1.

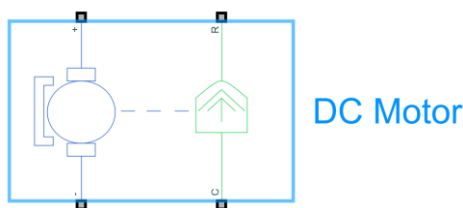


Рисунок 3.1 - Стандартний блок DC Motor, який знаходиться в бібліотеці Simscape/Electrical/Electromechanical/Brushed Motors

Стандартний блок DC Motor двигуна постійного струму моделює електричні характеристики та характеристики крутного моменту двигуна постійного струму за допомогою еквівалентної схеми заміщення, яка зображена на рисунку 3.2.

При використанні стандартного блок DC Motor двигуна постійного струму із бібліотеки Simscape необхідно задати параметри еквівалентної схеми заміщення для цієї моделі. Для цього потрібно два рази натиснути на модель, тоді відкривається вікно Model parameterization, яке зображено на рисунку 3.3.

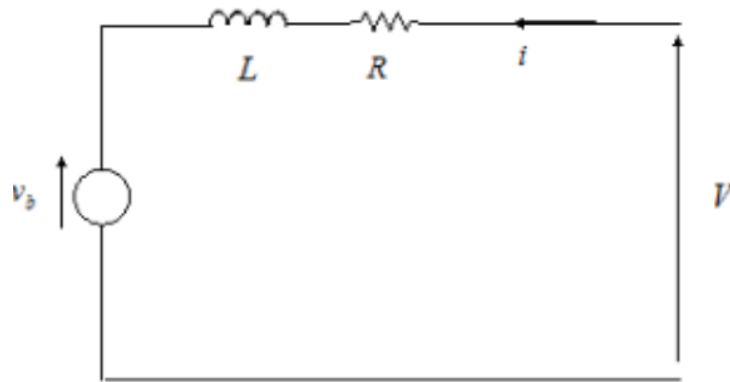


Рисунок 3.2 - Еквівалентна схема заміщення стандартного блоку DC Motor двигуна постійного струму бібліотеки Simscare

Block Parameters: DC Motor	
DC Motor Auto Apply	
Settings	Description
NAME	VALUE
Modeling option	No thermal port
Selected part	<click to select>
Electrical Torque	
Field type	Permanent magnet
Model parameterization	By equivalent circuit parameters
> Armature resistance	7.101 Ohm
Armature inductance	19e-5 H
Define back-emf or torque constant	Specify back-emf constant
Back-emf constant	0.36 V*s/rad
Configurability	Compile-time
Rotor damping parameterization	By damping value
Mechanical	
Rotor inertia	0.0034 kg*m^2
Rotor damping	60e-5 N*m*s/rad
> Initial rotor speed	0 rpm
Faults	

Рисунок 3.3 - Вікно Model parameterization блоку DC Motor

У вікні Model parameterization задамо параметри двигуна постійного струму EMG30 наведені, які в таблиці 3.1 [12].

Для дослідження кривих залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна використаємо імітаційну модель двигуна постійного струму EMG30 разом із додатковими блоками в середовищі MATLAB/SIMULINK, яка зображена на рисунку 3.4.

Таблиця 3.1 - Параметри двигуна постійного струму EMG30 [12]

Параметри	Значення
R_a	7,101 Ом
L_a	0,00019 Н
K_b	0,360 В·с/рад
Jm	0,0034 кг·м ²
Bm	0,000600 Нм/рад

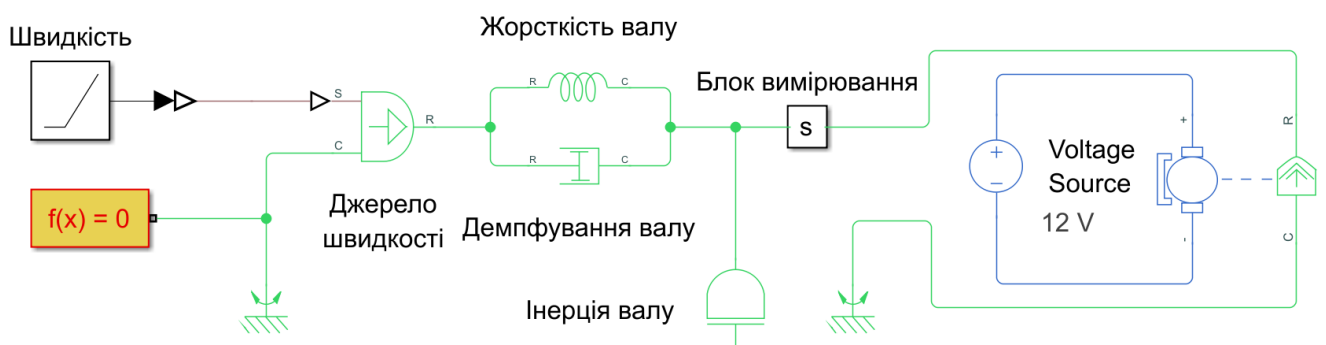


Рисунок 3.5 - Імітаційна модель двигуна постійного струму EMG30 в середовищі MATLAB/SIMULINK

До складу імітаційної моделі (рисунок 3.5) входить блок джерело швидкості із бібліотеки Simscape/Foundation Library/Mechanical/Mechanical Sources, який зображено на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 - Блок джерело швидкості із бібліотеки Simscape/Foundation Library/Mechanical/Mechanical Sources

Блок джерела ідеальної кутової швидкості являє моделює ідеальне джерело кутової швидкості, яке генерує диференціал швидкості на своїх терміналах, пропорційний вхідному фізичному сигналу. Джерело є ідеальним у тому сенсі, що воно вважається достатньо потужним, щоб підтримувати задану швидкість незалежно від крутного моменту, що діє на систему.

З'єднання R і C є механічними поворотними зберігаючими портами. Порт S є фізичним сигнальним портом, через який подається керуючий сигнал, який керує джерелом. Відносна швидкість (різниця швидкостей) через джерело прямо пропорційна сигналу на контрольному порту S. Уся різноманітність джерел сигналу може бути використана для створення бажаного профілю зміни швидкості.

Позитивний напрям блоку від порту R до каналу C. Це означає, що швидкість вимірюється як $\omega = \omega_R - \omega_C$, де ω_R , ω_C - абсолютні кутові швидкості в каналах R і C відповідно, а крутний момент через джерело додатний, якщо він спрямований від R до C. Потужність, що генерується джерелом, є від'ємною, якщо джерело доставляє енергію до порту R.

Жорсткість валу двигуна постійного струму моделюється блоком ротаційна пружина із бібліотеки Mechanical Rotational Elements, який зображено на рисунку 3.7.

Жорсткість валу



Рисунок 3.7 - Блок ротаційна пружина

Блок ротаційна пружина моделює ідеальну механічну обертальну лінійну пружину. Додатній напрям блоку - від порту R до порту C. Це означає, що крутний момент позитивний, якщо він діє в напрямку від R до C.

Демпфування валу двигуна постійного струму моделюється блоком демпфер обертання із бібліотеки Mechanical Rotational Elements, який зображено на рисунку 3.8.

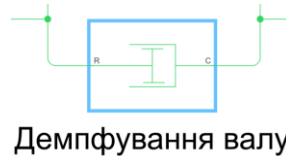


Рисунок 3.8 - Демпфер обертання із бібліотеки Mechanical Rotational Elements

Блок демпфер обертання моделює ідеальний механічний обертовий в'язкий демпфер. Позитивний напрям блоку - від порту R до порту C. Це означає, що крутний момент позитивний, якщо він діє в напрямку від R до C.

Інерція валу двигуна постійного струму моделюється блоком ідеальна механічна інерція обертання із бібліотеки Simscape/Foundation Library/Mechanical/Rotational Elements, зображений на рисунку 3.9.

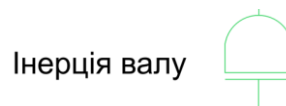


Рисунок 3.9 - блок ідеальна механічна інерція обертання

За замовчуванням блок має один механічний поступальний порт збереження. Позитивний напрям блоку - від його порту до контрольної точки. Це означає, що момент інерції позитивний, якщо інерція прискорюється в позитивному напрямку.

Для вимірювання кривих залежності крутного моменту та потужності від швидкості обертання двигуна використаємо блок вимірювання, який зображено на рисунку 3.10.



Рисунок 3.10 – Блок вимірювання

Блок вимірювання моделюється імітаційною моделлю, яка зображена на рисунку 3.11.

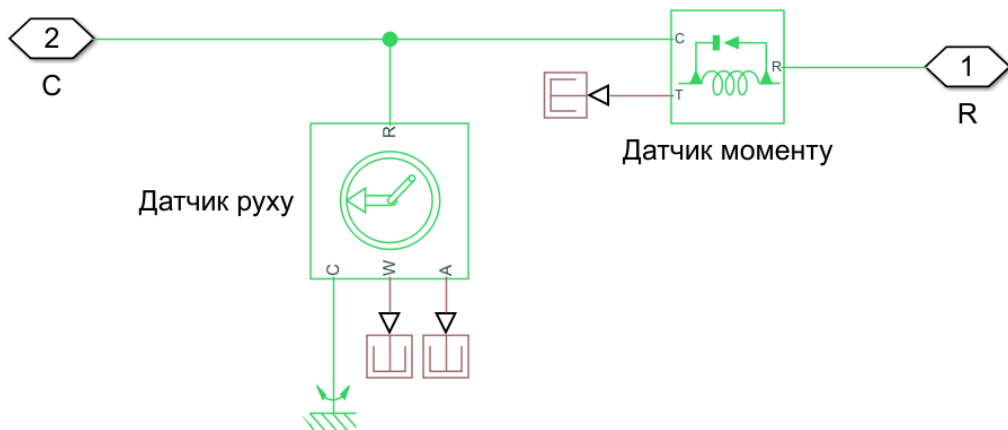


Рисунок 3.11 - Імітаційна модель блоку вимірювання

В результаті імітаційного моделювання двигуна постійного струму EMG30 в середовищі MATLAB/SIMULINK отримали графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна, який зображено на рисунку 3.12.

Аналіз графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна показує, що крутний момент двигуна постійного струму EMG30 лінійно зменшується при збільшенні частоти обертання двигуна.

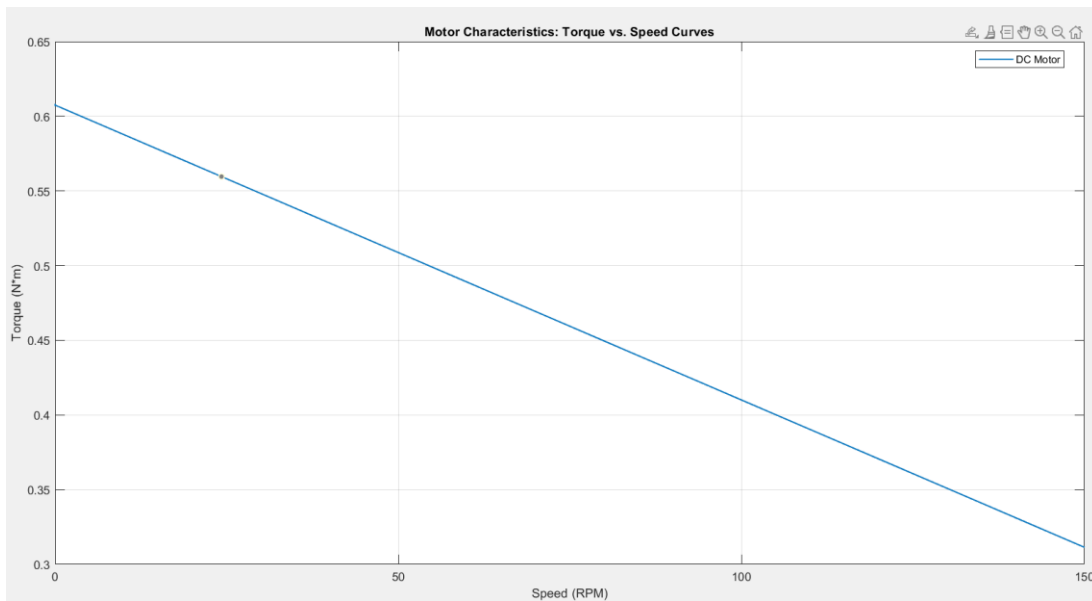


Рисунок 3.12 - Графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна

Також в результаті імітаційного моделювання двигуна постійного струму EMG30 в середовищі MATLAB/SIMULINK отримали графік залежності потужності від швидкості обертання двигуна, який зображено на рисунку 3.13.

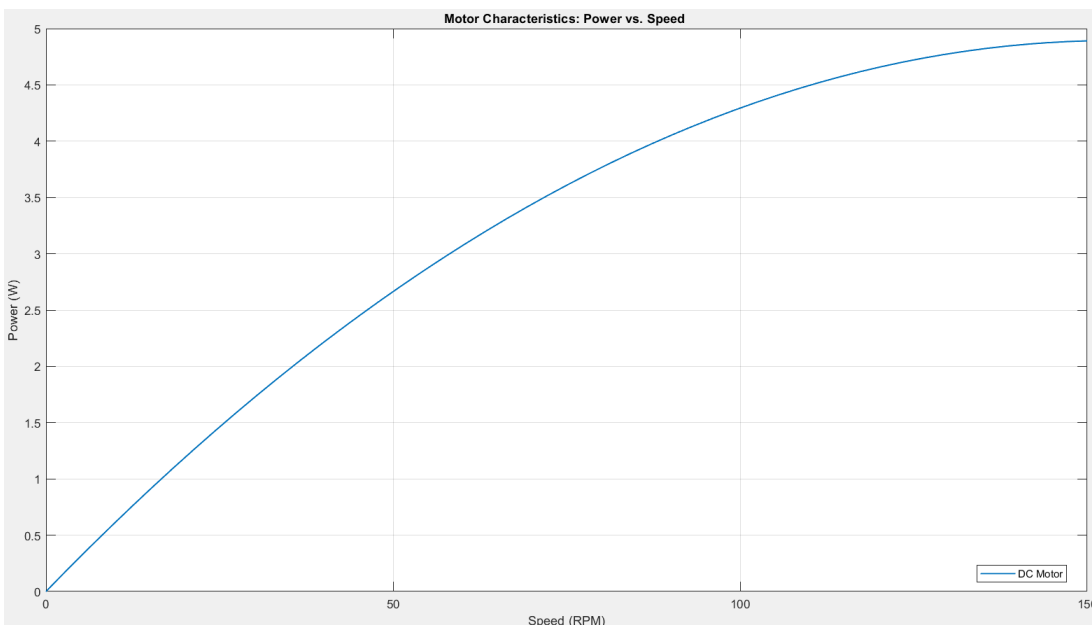


Рисунок 3.13 - Графік залежності потужності від швидкості обертання двигуна

Аналіз графік залежності потужності від швидкості обертання двигуна показує, що крутний момент двигуна постійного струму EMG30 нелінійно зростає при збільшенні частоти обертання двигуна.

3.2 Удосконалений метод керування електричним двигуном робота

У двигунах постійного струму, прикладена напруга V_a керує кутовою швидкістю ω ротора у відповідності до рисунку 3.14.

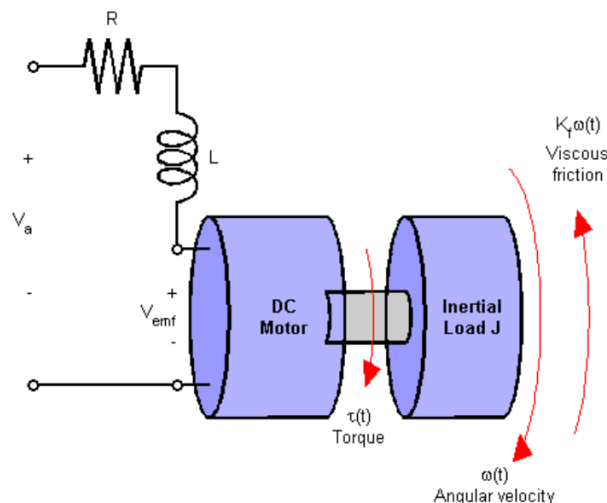


Рисунок 3.14 – Керування кутовою швидкістю ω ротора у двигуні постійного струму

На рисунку 3.15 показана спрощена модель керування двигуном постійного струму. Крутний момент T_d моделює збурення навантаження. В процесі керування кутовою швидкістю ω ротора у двигуні постійного струму необхідно звести до мінімуму коливання швидкості, які спричинені збурення навантаження.

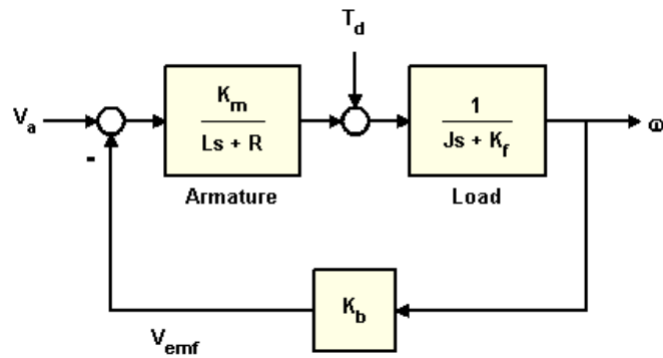


Рисунок 3.15 - Спрощена модель керування двигуном постійного струму

На рисунку 3.16 зображена Імітаційна модель керування двигуном постійного струму EMG30.

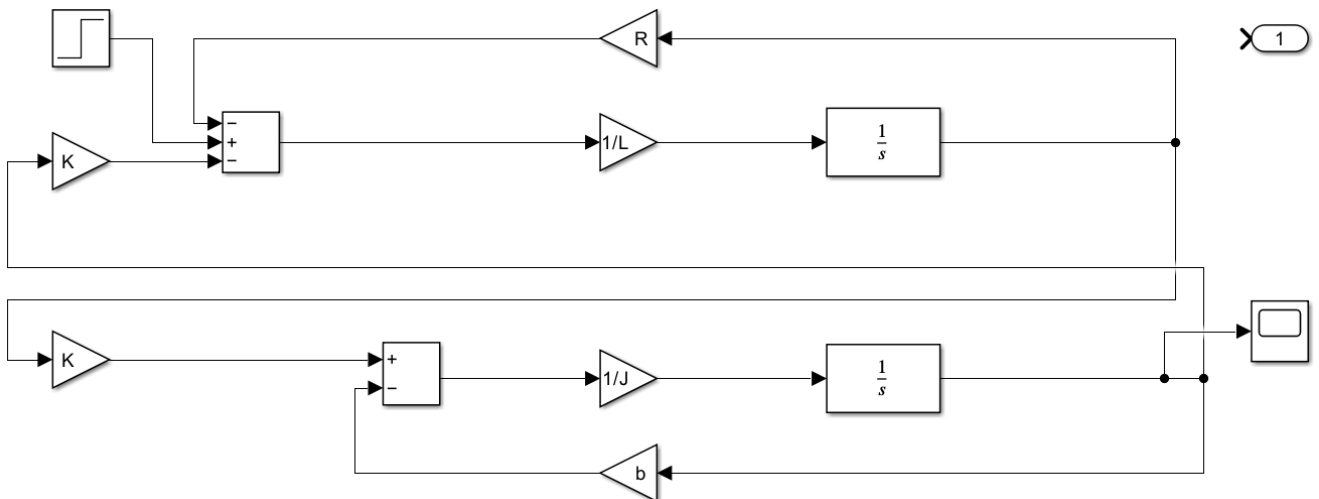


Рисунок 3.16 – Імітаційна модель керування двигуном постійного струму EMG30

Для двигуна постійного струму EMG30, який було вибрано для використання в якості приводу робота, параметри коефіцієнтів моделі мають наступні значення:

- опір якоря $R=7,101$ Ом;
- індуктивність якоря $L=0,00019$ Гн;

- момент інерції ротора $J=0,0034 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- коефіцієнт тертя $b=K_f=0,0006 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{с}$;
- константи двигуна $K=K_m=K_b=0,360 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$.

В результаті імітаційного моделювання отримали графік зміни кутової швидкості обертання в часі (рисунок 3.18) двигуна постійного струму EMG30 при подачі на його вхід напруги $V_a=12 \text{ В}$.

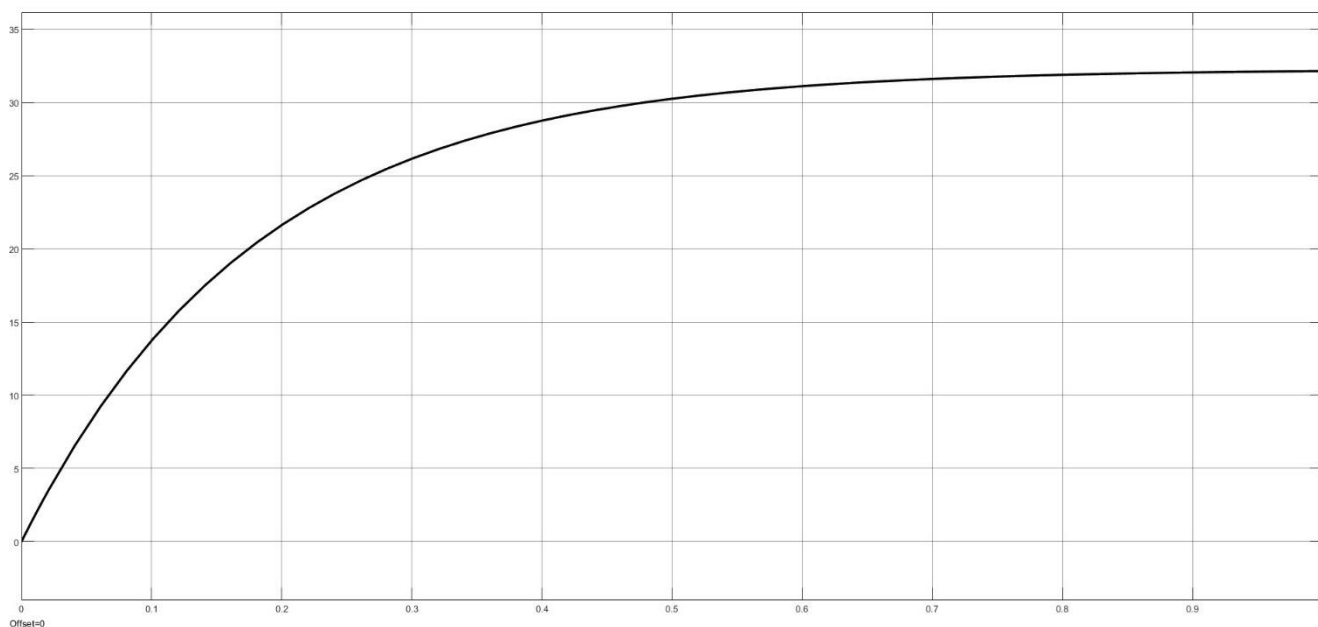


Рисунок 3.18 - Графік зміни кутової швидкості обертання в часі двигуна постійного струму EMG30 при подачі на його вхід напруги $V_a=12 \text{ В}$

Аналізуючи графік зміни кутової швидкості обертання в часі (рисунок 3.18) двигуна постійного струму EMG30 при подачі на його вхід напруги $V_a=12 \text{ В}$ можна зробити висновок, що двигун досягає кутової швидкості обертання $\omega=32 \text{ рад}/\text{с}$ за час $t=0,8 \text{ с}$.

Пропорційні-інтегрально-диференційні (ПІД) регулятори широко використовуються в промислових системах керування завдяки зменшенню кількості параметрів, які потрібно налаштувати. Вони забезпечують керуючі сигнали, пропорційні похибці між опорним сигналом і фактичним виходом (пропорційна дія), інтегралу похибки (інтегральна дія) і похідній похибки (похідна дія) у відповідності до рівняння (3.1).

$$U(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(r) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right], \quad (3.1)$$

де $u(t)$ - сигнал керування;

$e(t)$ - сигнал помилки;

K_p - пропорційний коефіцієнт підсилення;

T_i - інтегральний коефіцієнт підсилення;

T_d - диференційний коефіцієнт підсилення.

Передавальна функція ПІД регулятора описується виразом (3.2).

$$K(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i(s)} + T_d(s) \right]. \quad (3.2)$$

Передавальної функції ПІД-регулятора достатньо для більшості процесів керування. Оскільки структура ПІД-регулятора проста, це найпоширеніший метод керування, який використовується в промисловості.

Основне завдання ПІД-регулятора полягає в регулюванні відповідного пропорційного коефіцієнта підсилення (K_p), інтегрального коефіцієнта підсилення (T_i) та диференціального коефіцієнта підсилення (T_d) для досягнення оптимальних характеристик керування у відповідності до виразу (3.3).

$$K(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s. \quad (3.3)$$

Структурна схема ПД-регулятора зображена на рисунку (3.19).

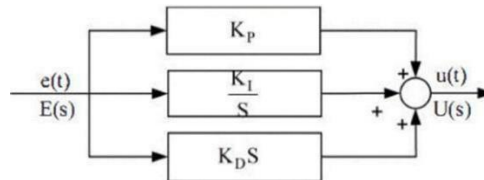


Рисунок 3.19 - Структурна схема ПД-регулятора

Основними особливостями ПД-регуляторів є здатність усувати стаціонарну похибку реакції на кроковий опорний сигнал (завдяки інтегральній дії) і здатність передбачати зміни на виході (коли використовується похідна дія).

Частинними випадками ПД-регулятора є ПД-регулятор та ПІ-регулятор. ПД-регулятор описується передавальною функцією (3.4).

$$K(s) = k_p + k_d s = k_d \left(s + \frac{k_p}{k_d} \right). \quad (3.4)$$

ПД-регулятор додає один нуль до передавальної функції контуру. Особливістю характеристичного полінома замкненого контуру є фазовий внесок ПД-регулятора збільшується від 0° на низьких частотах до 90° на високих частотах.

З практичних міркувань до ПД-регулятора можна додати полюс з малою постійною часу T_f . Полюс допомагає обмежити коефіцієнт підсилення контуру на високих частотах, що є бажаним для відсікання завад. Модифікований ПД-регулятор описується передавальною функцією (3.5).

$$K(s) = k_p + \frac{k_d s}{T_f s + 1}. \quad (3.5)$$

Модифікований ПД-регулятор дуже схожий на фазоінвертор першого порядку, він так само використовується для покращення перехідної характеристики системи.

ПІ-регулятор описується передавальною функцією (3.6).

$$K(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_p(s + k_i/k_p)}{s}. \quad (3.6)$$

ПІ-регулятор додає полюс на початку координат (інтегратор) і скінченний нуль в коло зворотного зв'язку. Наявність інтегратора в контурі змушує помилку на вході прямувати до нуля в усталеному режимі, тому ПІ-регулятор широко використовується при проектуванні сервомеханізмів.

Нуль регулятора зазвичай розміщується близько до початку координат у комплексній s -площині. Наявність пари полюс-нуль додає полюс замкненої системи з великою постійною часу. Розташування нуля можна регулювати так, щоб внесок повільного режиму в загальну реакцію системи залишався малим.

Основна ідея частотно-орієнтованого проектування полягає у використанні діаграми Бode передавальної функції розімкнутого контуру керування для оцінки реакції замкнутого контуру керування. Додавання контролера до системи змінює діаграму Бode у розімкнутого контурі, тим самим змінюючи реакцію замкнутого контуру.

Суть удосконаленого методу керування електричним двигуном робота полягає у розробці контролера, щоб формувати діаграму Бode з розімкнутим контуром таким чином, щоб система із замкнутим контуром поведилася бажаним чином.

Це механізм керування, який використовує інформацію від вимірювань контрольованої змінної для маніпулювання змінною з метою отримання бажаного результату. Контролер керується похибкою між фактичним виходом процесу та заданим значенням.

Діаграму Боде передавальної функції розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота побудуємо у Matlab за допомогою скрипта.

$$J=0.0034;$$

$$K = 0.36;$$

$$b = 0.0006;$$

$$L = 0.00019;$$

$$R = 7.101;$$

$$FT = tf(K, [J*L J*R+b*L K*K+b*R]);$$

$$\text{bodeplot}(FT);$$

У цьому скрипті передавальна функція розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота FT описується рівнянням (3.7).

$$FT(s) = \frac{K}{J \cdot L \cdot s^2 + (J \cdot R + b \cdot L) \cdot s + b \cdot R + K^2}. \quad (3.7)$$

Діаграма Боде передавальної функції розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота зображена на рисунку 3.20.

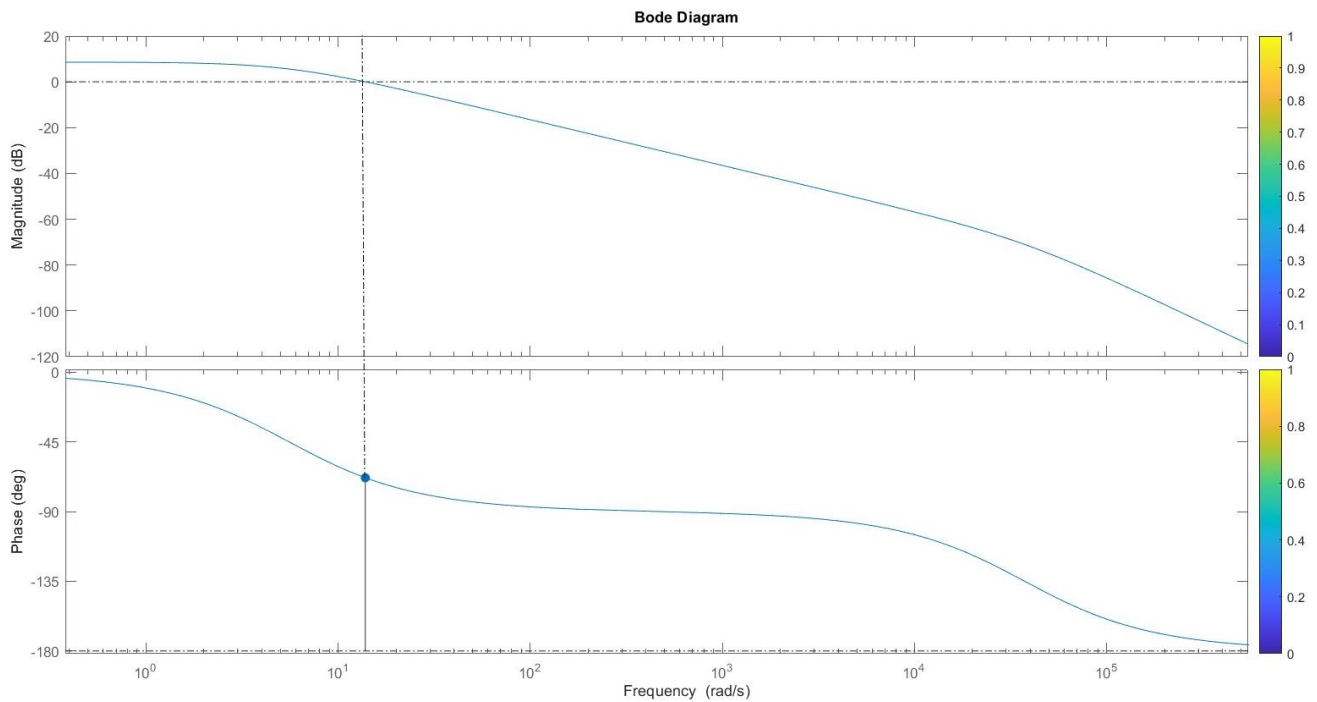


Рисунок 3.20 - Діаграма Бode передавальної функції розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота

З наведеного вище графіка діаграми Бode видно, що запас по фазі розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота на даний момент нескінченний, що свідчить про те, що система є стійкою. Але проблема полягає в тому, що на частотах від 0 рад/с до 13,8 рад графік амплітуд вищий 0 дБ, тому перехідна характеристика стабілізується на значенні 2,69 у відповідності до рисунку 3.21.

Це означає, що розімкнутому контуру керування електричним двигуном робота буде важко відстежувати різні опорні сигнали без надмірної похибки. Тому потрібно зменшити коефіцієнт підсилення розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота, зберігаючи при цьому достатній запас по фазі.

Запас по фазі в 60 градусів, як правило, достатній для запасу стійкості. З наведеного вище графіка діаграми Бode видно, що цей запас по фазі досягається для частоти перетину 13,8 рад/с.

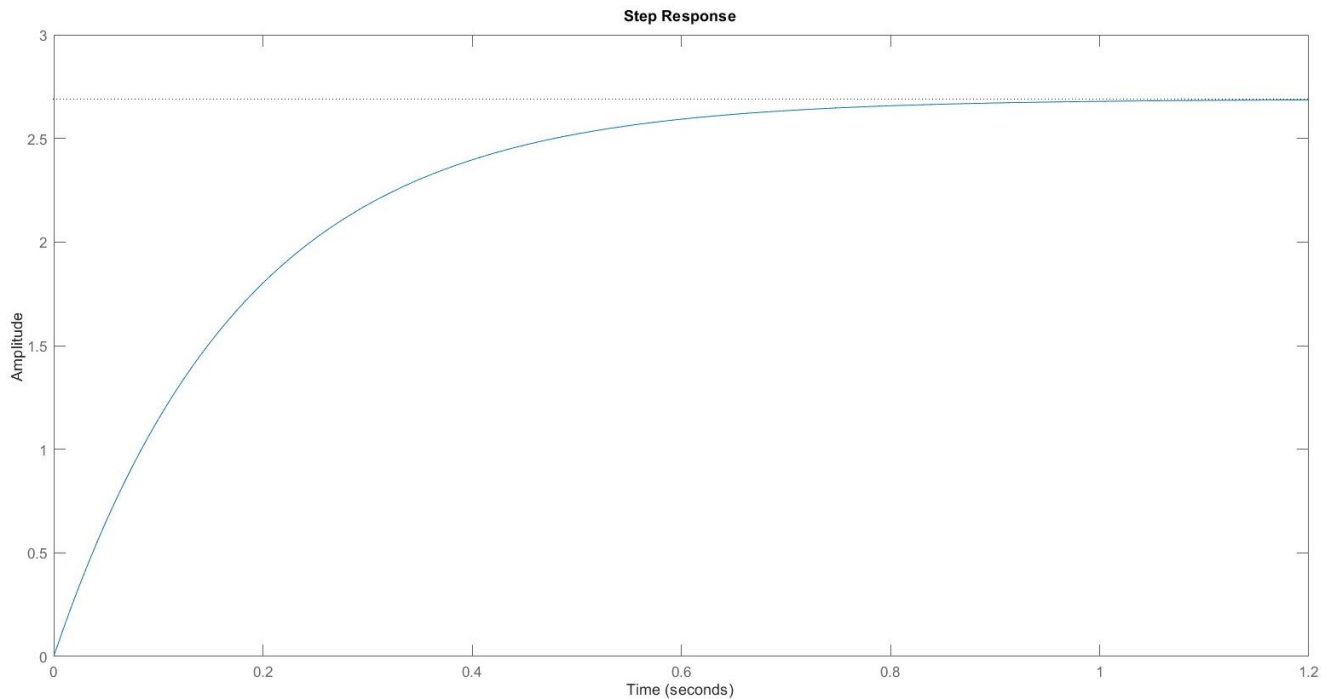


Рисунок 3.21 - Перехідна характеристика розімкнутому контуру керування електричним двигуном робота

Коефіцієнт послаблення, необхідний для того, щоб опустити графік амплітудної характеристики так, щоб частота кросовера була 13,8 рад/с, становить приблизно 40 дБ. Точну фазу і коефіцієнт підсилення діаграми Бode на певній частоті можна визначити, клацнувши на графіку на відповідній частоті. Точний запас по фазі для частоти підсилення кросовера 13,8 рад/с становить:

$$\Delta\varphi = 180^\circ - 68^\circ = 112^\circ. \quad (3.8)$$

Точна величина коефіцієнта підсилення на цій частоті дорівнює $K_m=8,565$ дБ. Тоді пропорційний коефіцієнт підсилення $1/2,69=0,372$ забезпечить коефіцієнт підсилення у розімкнутому контурі одиничне підсилення для частоти 13,8 рад/с.

На рисунку 3.22 зображена імітаційна модель керування електричним двигуном робота із розімкнутим контуром та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p = 0,372$.

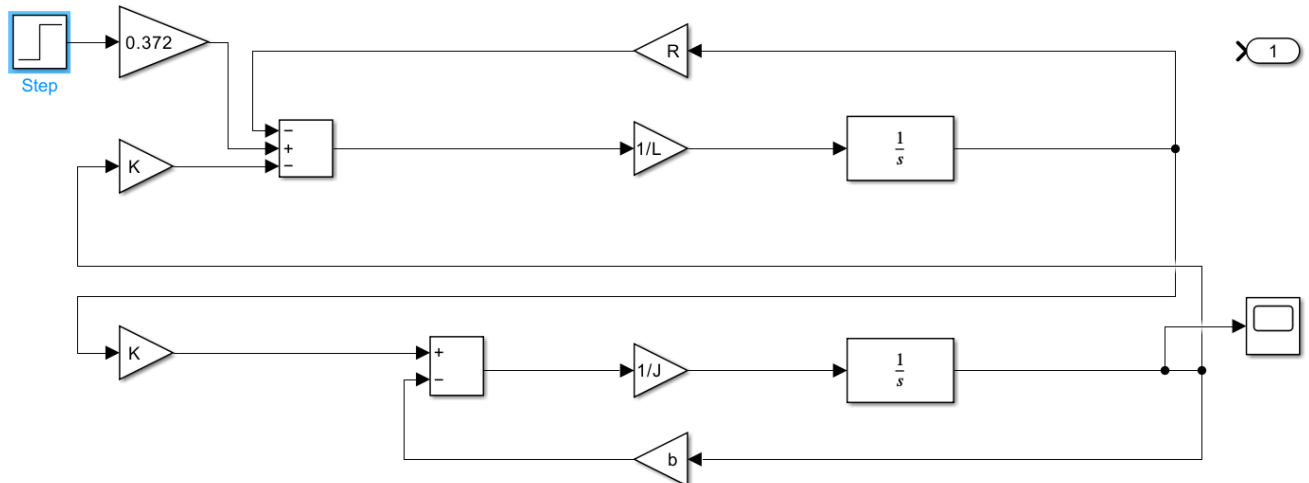


Рисунок 3.22 - Імітаційна модель керування електричним двигуном робота із розімкнутим контуром та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p = 0,372$

Діаграма Боде передавальної функції розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота із розімкнутим контуром та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p = 0,372$ зображена на рисунку 3.23.

Аналіз та порівняння діаграми Боде передавальної функції розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота (рисунок 3.20) та модифікованої діаграми Боде передавальної функції розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота із розімкнутим контуром та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p = 0,372$ (рисунок 3.23) показує, що введення пропорційного коефіцієнта підсилення (ослаблення) $K_p = 0,372$ покращило характеристику керування.

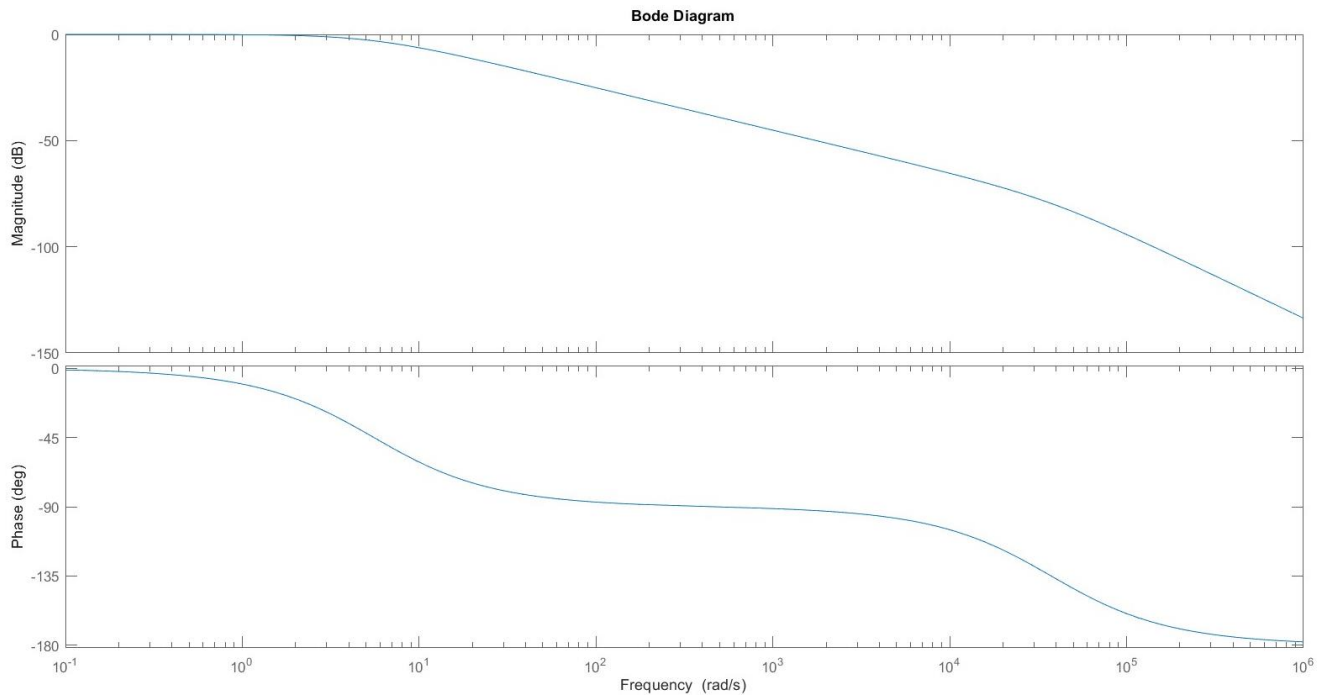


Рисунок 3.23 - Модифікована діаграма Боде передавальної функції розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота із розімкнутим контуром та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p = 0,372$

Також покращення характеристик та властивостей керування електричним двигуном робота із розімкнутим контуром та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p = 0,372$ спостерігається на модифікованій перехідній характеристиці, яка зображена на рисунку 3.24.

Порівнюючи перехідну характеристику розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота із розімкнутим контуром, яка зображена на рисунку 3.21 та перехідну характеристику розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота із розімкнутим контуром та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p = 0,372$, яка зображена на рисунку 3.21, можна робити висновок, що зараз модифікована перехідна характеристика асимптотично наближається до одиниці, а не до 2,69, як у попередньому разі.

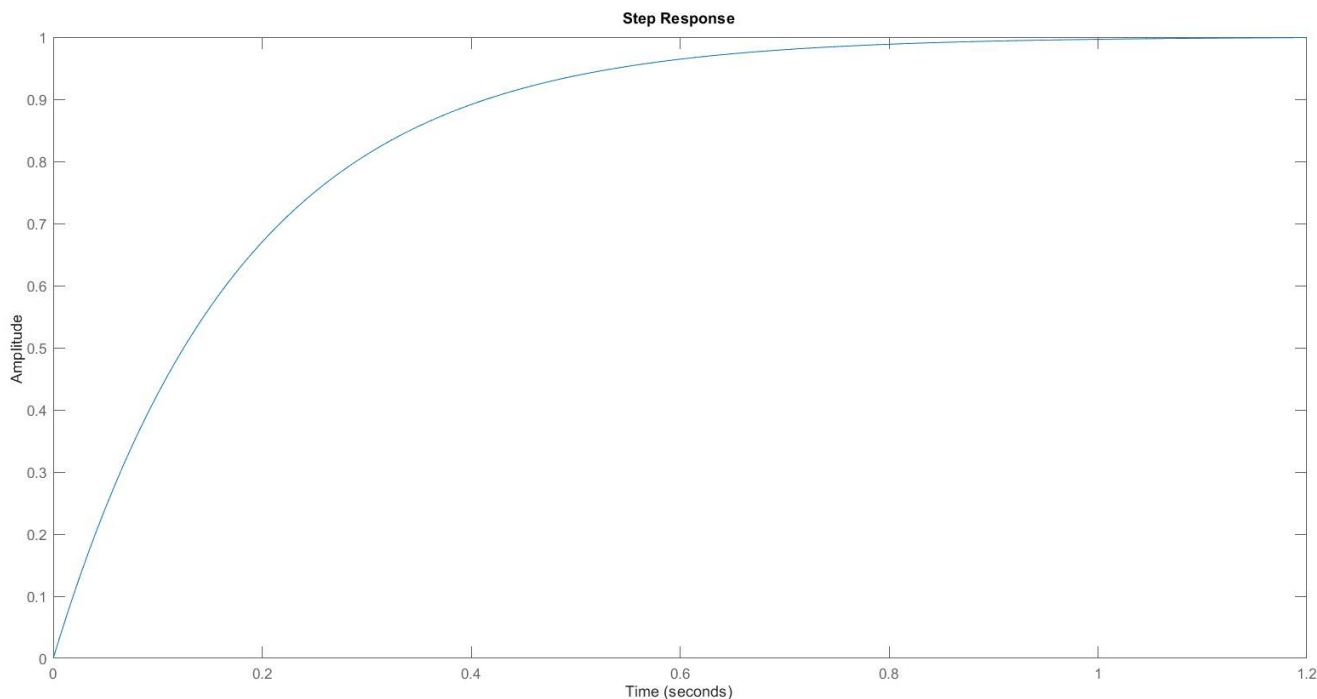


Рисунок 3.24 - Модифікована перехідна характеристика розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота із розімкнутим контуром та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p = 0,372$

Час встановлення для розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота із розімкнутим контуром та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p = 0,372$ є досить швидким, тому перерегулювання та стаціонарна похибка є більш доречними.

Перерегулювання становить менше 5%, стаціонарна помилка менше 1%. Компенсатор запізнювання тут не може бути корисним, оскільки він може зменшити частоту підсилення кросовера, щоб збільшити фазовий запас, не зменшуючи при цьому коефіцієнт підсилення системи за постійним струмом.

3.3 Висновки до третього розділу

1. В результаті імітаційного моделювання двигуна постійного струму EMG30 в середовищі MATLAB/SIMULINK отримали графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна, який зображено на рисунку 3.12.

2. Аналіз графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна показує, що крутний момент двигуна постійного струму EMG30 лінійно зменшується при збільшенні частоти обертання двигуна.

3. Також в результаті імітаційного моделювання двигуна постійного струму EMG30 в середовищі MATLAB/SIMULINK отримали графік залежності потужності від швидкості обертання двигуна.

4. Основна ідея частотно-орієнтованого проектування полягає у використанні діаграми Бode передавальної функції розімкнутого контуру керування для оцінки реакції замкнутого контуру керування. Додавання контролера до системи змінює діаграму Бode у розімкнутого контуру, тим самим змінюючи реакцію замкнутого контуру.

5. Час встановлення для розімкнутого контуру керування із розімкнутим контуром та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p = 0,372$ є досить швидким, тому перерегулювання та стаціонарна похибки є більш доречними.

6. Перерегулювання становить менше 5%, стаціонарна помилка менше 1%. Компенсатор запізнювання тут не може бути корисним, оскільки він може зменшити частоту підсилення кросовера, щоб збільшити фазовий запас, не зменшуючи при цьому коефіцієнт підсилення системи за постійним струмом.

7. Аналіз та порівняння діаграми Бode розімкнутого контуру керування та модифікованої діаграми Бode розімкнутого контуру керування та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p = 0,372$, показує, що введення пропорційного коефіцієнта підсилення (послаблення) $K_p = 0,372$ покращило характеристику керування.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ РОБОТА

4.1 Імітаційне моделювання удосконаленого методу керування електричним двигуном робота на основі ПІД-регулятора

Для проведення імітаційного моделювання удосконаленого методу керування електричним двигуном робота на основі ПІД-регулятора додайте ПІД-регулятор до математичної моделі EMG30 в Simulink, щоб порівняти її з розімкнутою системою.

Імітаційна модель удосконаленого методу керування електричним двигуном робота на основі ПІД-регулятора зображена на рисунку 4.1.

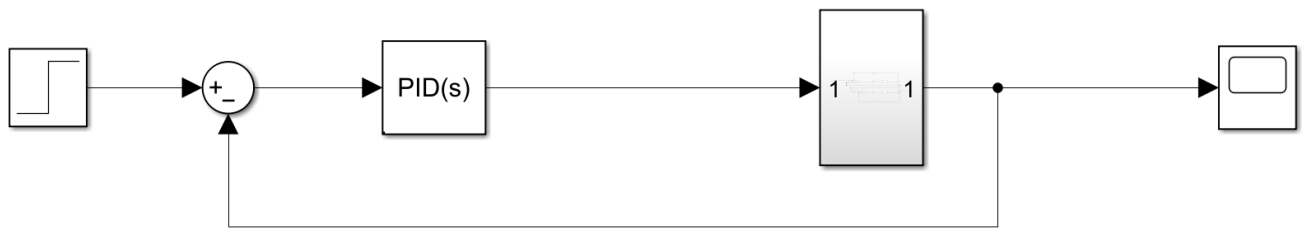


Рисунок 4.1 - Імітаційна модель удосконаленого методу керування електричним двигуном робота на основі ПІД-регулятора

До складу імітаційної моделі удосконаленого методу керування електричним двигуном робота на основі ПІД-регулятора входить ПІД-регулятор та імітаційна модель розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота, яка зображена на рисунку 4.2.

В якості ПІД-регулятора використаємо стандартний блок PID(s) із бібліотеки Simulink/Continuous/PID Controller. Вихід блоку є зваженою сумою вхідного сигналу, інтеграла вхідного сигналу та похідної вхідного сигналу. Ваговими коефіцієнтами є пропорційні, інтегральні та похідні параметри посилення. Поліс першого порядку фільтрує похідну дію.

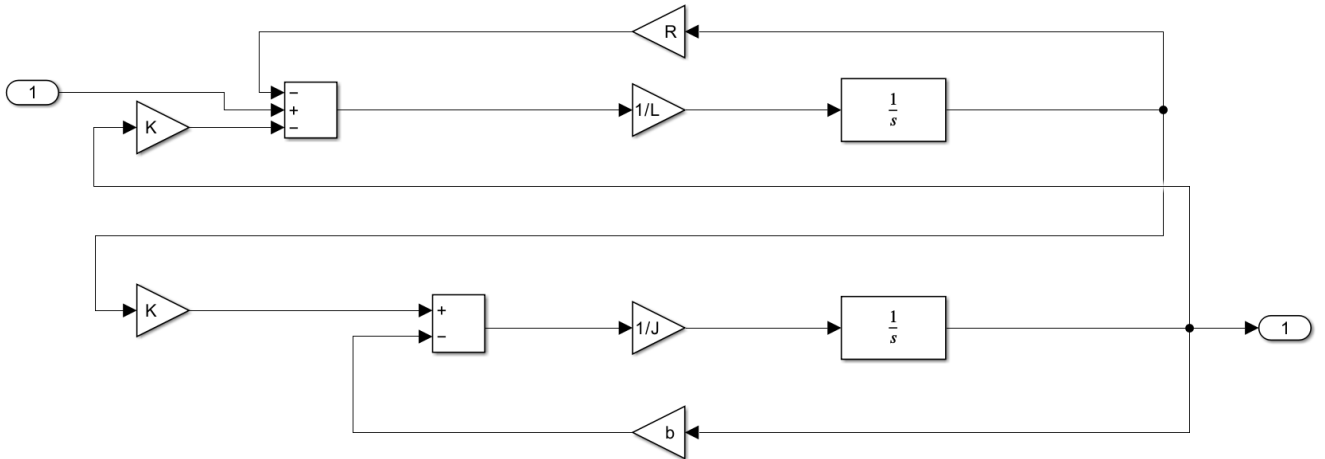


Рисунок 4.2 - Імітаційна модель розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота

Імітаційна модель стандартного блоку PID(s) із бібліотеки Simulink/Continuous/PID Controller зображена на рисунку 4.3.

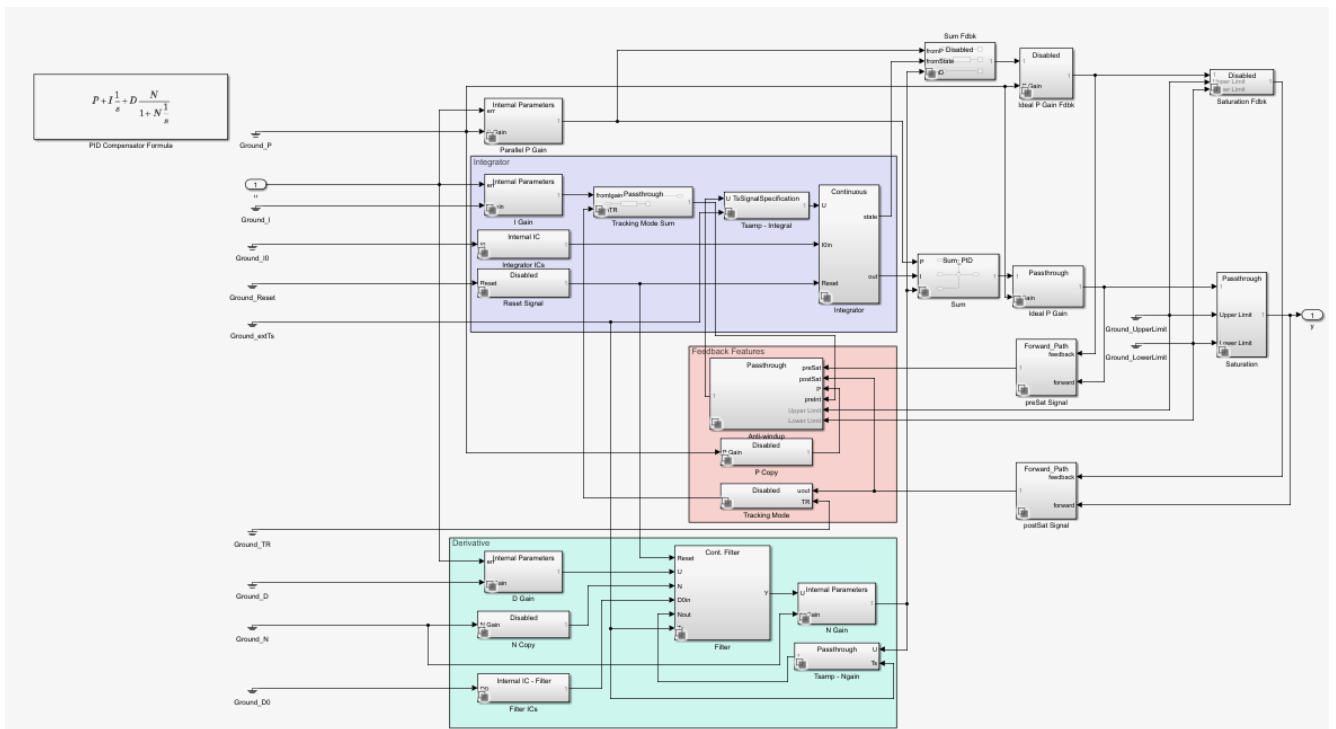


Рисунок 4.3 - Імітаційна модель стандартного блоку PID(s) із бібліотеки Simulink/Continuous/PID Controller

Блок підтримує кілька типів і структур контролерів. Блок PID(s) із бібліотеки Simulink/Continuous/PID Controller має такі настроювані опції.

1. Тип контролера (PID, PI, PD, лише P або лише I).
2. Форма контролера (паралельна або ідеальна).
3. Часовий домен (безперервний або дискретний).
4. Початкові умови та тригер скидання.
5. Обмеження насичення вихідного сигналу та вбудований механізм захисту від перемотування.
6. Відстеження сигналу для плавної передачі керування та багатоконтурного керування.

Під налаштуванням ПД-регулятора розуміється вибір коефіцієнтів підсилення регулятора: k_p , k_d , k_i для досягнення бажаних характеристик. Промислові ПД-регулятори часто налаштовуються з використанням емпіричних правил, таких як правила Зіглера-Ніколса.

Метод критичної точки Зіглера-Ніколса (другий метод Зіглера-Ніколса) базується на знанні критичної точки процесу. Експериментально процес зациклюється на простому пропорційному регуляторі, коефіцієнт підсилення якого збільшується до тих пір, поки система не перейде в постійні коливання.

Коефіцієнт підсилення збільшується до тих пір, поки система не перейде в постійні коливання, тобто ми не опинимося на межі стійкості. Визначивши критичний коефіцієнт підсилення $K_{кр}$ регулятора та період часу, параметри обраного регулятора можна розрахувати за допомогою таблиці.

У другому методі Зіглера-Ніколса запропоновані значення призводять до відносно короткого часу наростання, тому при великому перерегулюванні така ситуація не завжди є задовільною. Далі доведеться скоригувати запропоновані коефіцієнти i , зокрема, зменшити коефіцієнт підсилення K_p .

Слід зазначити, що параметри T_i і T_d , запропоновані двома методами Зіглера-Ніколса, перебувають у постійному співвідношенні, що дорівнює параметрам, запропонованим двома методами. Методи знаходяться в постійному

співвідношенні. Таким чином, регулятор має два об'єднані нулі, які дорівнюють $-1/(2Td) = -2/Ti$.

Таблиця 4.1 - Параметри ПІД-регулятор за другим методом Зіглера-Ніколса

Тип контролера	K_p	k_i	k_d
P	$0,5K_{кр}$	-	-
PI	$0,4K_{кр}$	$0,8T_{кр}$	-
PID	$0,6K_{кр}$	$0,5T_{кр}$	$0,125T_{кр}$

У другому методі Зіглера-Ніколса на частотній характеристикі процесу $G_p(s)$ потрібно виміряти наступні параметри.

Критичний коефіцієнт підсилення:

$$K_{кр} = \frac{1}{G \cdot \pi} \quad (4.1)$$

Критичний період:

$$T_{кр} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega \cdot \pi} \quad (4.2)$$

Під замкнутим циклом розуміється робота системи керування з керуючим пристроєм в автоматичному режимі, де потік інформації від чутливого елемента до передавача, до контролера, до елемента керування до процесу і назад до датчика має вигляд неперервного замкнутого контуру зворотного зв'язку.

Якщо загальна величина підсилення сигналу, що забезпечується приладами, занадто велика, коло зворотного зв'язку буде самоколиватися на власній (резонансній) частоті системи.

Хоча коливання майже завжди вважаються небажаними в системі керування, вони можуть бути використані як дослідницька перевірка динаміки процесу, якщо контролер діє виключно на пропорційну дію (без інтегральної або

похідної дії): надаючи дані, корисні для розрахунку ефективних налаштувань ПД-регулятора.

Таким чином, процедура налаштування ПД-регулятора із замкнутим контуром здійснюється шляхом відключення будь-яких інтегральних або похідних дій в контролері, а потім підвищення значення коефіцієнта підсилення контролера настільки, щоб виникали самопідтримувані коливання.

Мінімальна величина коефіцієнта підсилення регулятора, необхідна для підтримки синусоїдальних коливань, називається критичною чутливістю ($S_{кр}$) або критичним коефіцієнтом підсилення $K_{кр}$ процесу, а час (період) між послідовними піками коливань називається критичним періодом $T_{кр}$ процесу. Потім ми можемо використовувати виміряні значення $K_{кр}$ і $T_{кр}$ для обчислення обґрунтованих значень параметрів налаштування контролера (K_p , k_i та/або k_d).

При виконанні такого випробування на технологічному контурі важливо стежити за тим, щоб піки коливань не досягали меж контрольно-вимірювальних приладів, ні вимірювального, ні кінцевого керуючого елемента.

Іншими словами, для того, щоб коливання точно виявили технологічні характеристики граничної чутливості і кінцевого періоду, коливання повинні бути природно обмежені, а не штучно обмежені.

Слід уникати коливань, що характеризуються тим, що передавач або кінцевий керуючий елемент досягають меж свого діапазону, щоб отримати найкращі результати коливальних випробувань замкнутого контуру.

Якщо контролер є лише пропорційним (тобто не здатний забезпечувати жодних інтегральних або похідних керуючих впливів), рекомендація методу Зіглера-Ніколса полягає в тому, щоб встановити коефіцієнт підсилення контролера на половину значення граничної чутливості, визначеного у тесті із замкнутим циклом, який називається критичним коефіцієнтом підсилення ($K_{кр}$):

$$K_p = 0,5K_{кр}, \quad (4.3)$$

де K_p - значення коефіцієнта підсилення контролера, яке необхідно встановити для хорошої продуктивності;

Ккр - критичний коефіцієнт підсилення, що визначається збільшенням коефіцієнта підсилення контролера до тих пір, поки не будуть досягнуті самопідтримувані коливання.

Як правило, коефіцієнт підсилення контролера в половину експериментально визначеного критичного коефіцієнта підсилення призводить до досить швидкої реакції на зміну заданого значення і навантаження процесу.

Коливання змінної процесу після таких змін заданого значення і навантаження, як правило, тьмяні, причому кожен наступний пік хвилі становить приблизно одну чверть амплітуди попереднього. Це називається чверть хвильовим демпфуванням. Це компроміс між швидкою реакцією та стабільністю.

На рисунку 4.4 зображено чверть хвильовим демпфуванням з контролером в автоматичному режимі, коли змінна процесу PV демонструє затухаючі коливання після ступінчастої зміни заданого значення SP.

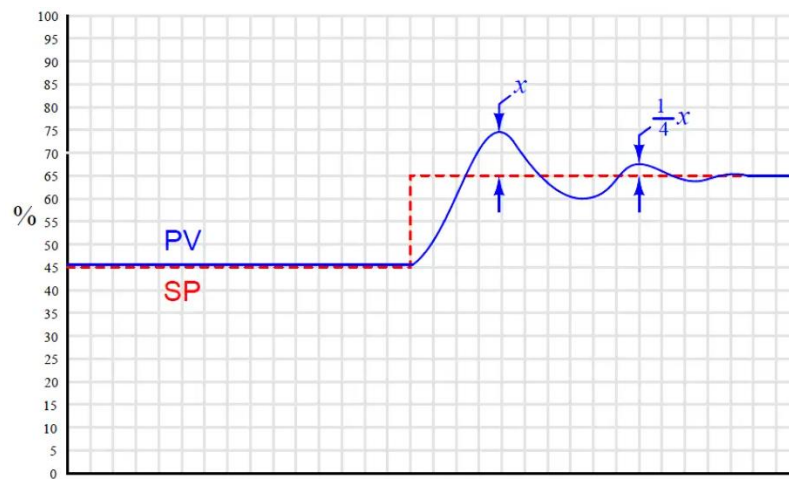


Рисунок 4.4 - Чверть хвильовим демпфуванням

Твердження про те, що налаштування чутливості на половину кінцевого з супутнім 25-відсотковим співвідношенням амплітуди забезпечує оптимальний контроль, має бути змінено в деяких випадках.

Наприклад, фактичний рівень, що підтримується регулятором рівня рідини, може бути не настільки важливим, як вплив раптових рухів клапана на подальші ділянки процесу.

У цьому випадку чутливість повинна бути знижена, щоб зменшити відношення амплітуд, навіть якщо при цьому зсув збільшується. З іншого боку, додаток для контролю тиску, що дає коливання з дуже коротким періодом, може бути налаштований на 80 або 90-відсоткове відношення амплітуд.

Через короткий період збурення згасало в розумні терміни, навіть незважаючи на те, що коливань було досить багато. Зсув буде дещо зменшений, хоча слід мати на увазі, що він ніколи не може бути зменшений до менш ніж половини величини, наведеної нами при попередньо визначеній нами оптимальній чутливості, що дорівнює половині кінцевої

Дехто може стверджувати, що чверть хвильове демпфуванням без потреби задіює регулюючий клапан, спричиняючи надмірний знос ущільнювача штока та споживаючи велику кількість стисненого повітря з часом.

З огляду на той факт, що всі сучасні технологічні контролери мають інтегральну здатність, на відміну від простих пневматичних контролерів часів Зіглера і Ніколса, насправді немає необхідності терпіти тривале зміщення - нездатність змінної процесу точно вирівнятися з заданим значенням з часом, як необхідні витрати на уникнення коливань клапана.

Якщо контролер має інтегральну дію на додаток до пропорційної, рекомендація Зіглера і Ніколса полягає в тому, щоб встановити коефіцієнт підсилення контролера трохи менше половини значення критичної чутливості, а інтегральну постійну часу встановити значення, трохи менше кінцевого періоду:

$$K_p = 0,45K_{кр}. \quad (4.3)$$

Важливим застереженням при будь-якій процедурі налаштування, заснованої на максимальному підсиленні, є можливість викликати проблеми в процесі при експериментальному визначенні кінцевого посилення.

Враховуючи, що критичний коефіцієнт підсилення - це величина коефіцієнта підсилення контролера пропорційної дії, що призводить до самопідтримуваних коливань постійної амплітуди.

Для того, щоб точно визначити цю установку підсилення, необхідно витратити деякий час, провокуючи процес раптовими змінами заданих значень (щоб викликати коливання) і експериментуючи з все більшими і більшими налаштуваннями підсилення, поки не буде досягнута постійна амплітуда коливань.

Будь-який коефіцієнт підсилення, що перевищує критичне значення, звичайно, призводить до постійно зростаючих коливань, які можна взяти під контроль, тільки зменшивши коефіцієнт підсилення контролера або перейшовши в ручний режим (тим самим припинивши будь-який зворотний зв'язок в системі).

Проблема полягає в тому, що ніколи не можна знати напевно, коли досягається граничний коефіцієнт посилення, поки не буде перевищено це критичне значення, про що свідчать постійно зростаючі коливання.

Іншими словами, система повинна бути доведена до межі тотальної нестабільності, щоб визначити її кінцеве значення виграшу. Це не тільки трудомістке досягнення – особливо в системах, де природний період коливань є тривалим, як у випадку з багатьма системами контролю температури та складу – але й потенційно небезпечним для обладнання та, безумовно, шкідливим для якості процесу.

Незважаючи на практичну обмеженість, правила, наведені Зіглером і Ніколсом, проливають світло на взаємозв'язок між реалістичними параметрами налаштування КП, КІ та КД, а також експлуатаційними характеристиками процесу.

Коефіцієнт підсилення контролера повинен становити деяку частку коефіцієнта підсилення, необхідного для самоколивання процесу. Інтегральна постійна часу повинна бути пропорційна постійній часу процесу; Тобто, чим «повільніше» реагує процес, тим «повільніше» (менш агресивно) повинна бути інтегральна реакція контролера.

Похідна константа часу також повинна бути пропорційна константі часу процесу, хоча це має протилежне значення з точки зору агресивності: «повільний» процес заслуговує на довгу похідну константу часу; тобто більш агресивна похідна дія.

4.2 Результати імітаційного моделювання удосконаленого методу керування електричним двигуном робота на основі ПІД-регулятора

Використовуючи метод Зіглера-Ніколса, визначимо вимірне значення критичного коефіцієнта підсилення $K_{кр}=0,075$ та критичного періоду $T_{кр}=0,62$. Тоді коефіцієнти ПІД-регулятора обраховуються за наступними виразами.

$$K_p=0,6 \cdot K_{кр}=0,6 \cdot 0,075=0,045; \quad (4.4)$$

$$K_i=0,5 \cdot T_{кр}=0,5 \cdot 0,62=0,31; \quad (4.5)$$

$$K_d=0,125 \cdot T_{кр}=0,125 \cdot 0,62=0,0775. \quad (4.4)$$

Задамо параметри ПІД-регулятора в імітаційну модель у відповідності до рисунку 4.5

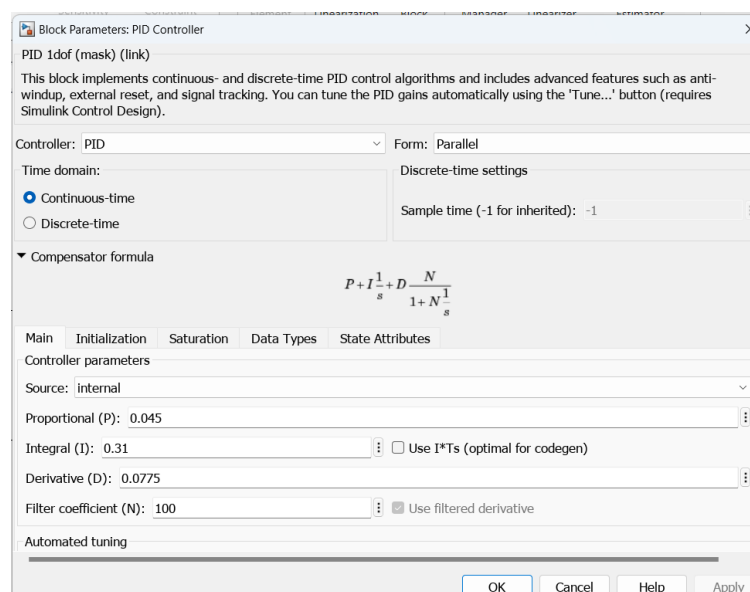


Рисунок 4.5 - Параметри ПІД-регулятора

Виконаємо імітаційне моделювання замкнутого контуру керування електричним двигуном робота. В результаті отримуємо графіки діаграми Боде та перехідної характеристики, які зображені відповідно на рисунку 4.6 та рисунку 4.7.

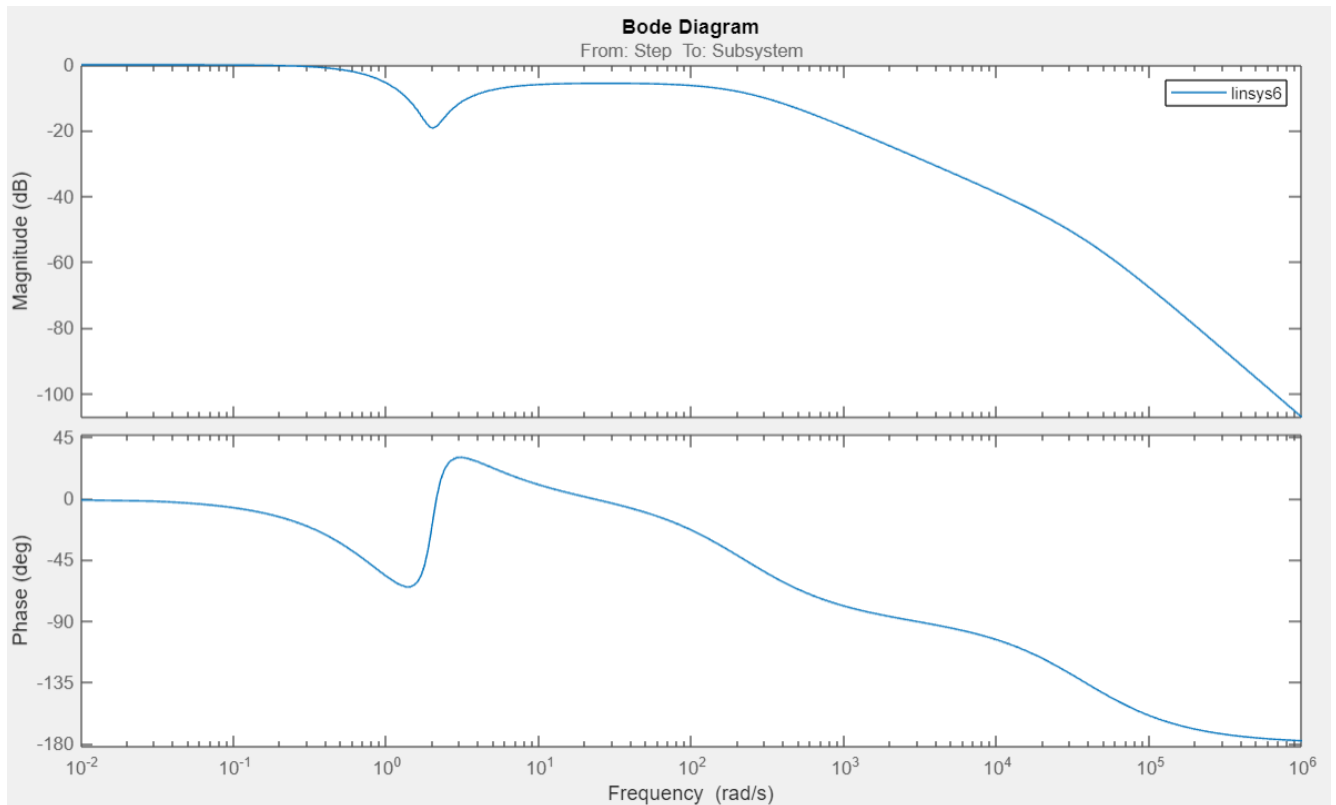


Рисунок 4.6 - Графік діаграми Боде

Аналізуючи графік діаграми Боде (рисунку 4.6), можна зробити висновок, що амплітудна та фазова характеристики мають значні пульсації. Аналогічний висновок можна зробити, проаналізувавши графік перехідної характеристики. Який зображено на рисунку 4.7.

Для зменшення пульсацій графіка діаграми Боде та перехідної характеристики замкнутого контуру керування електричним двигуном робота виконаємо повторне налаштування коефіцієнта $K_d=0,0007$, який відповідає за диференціювання сигналу помилки.

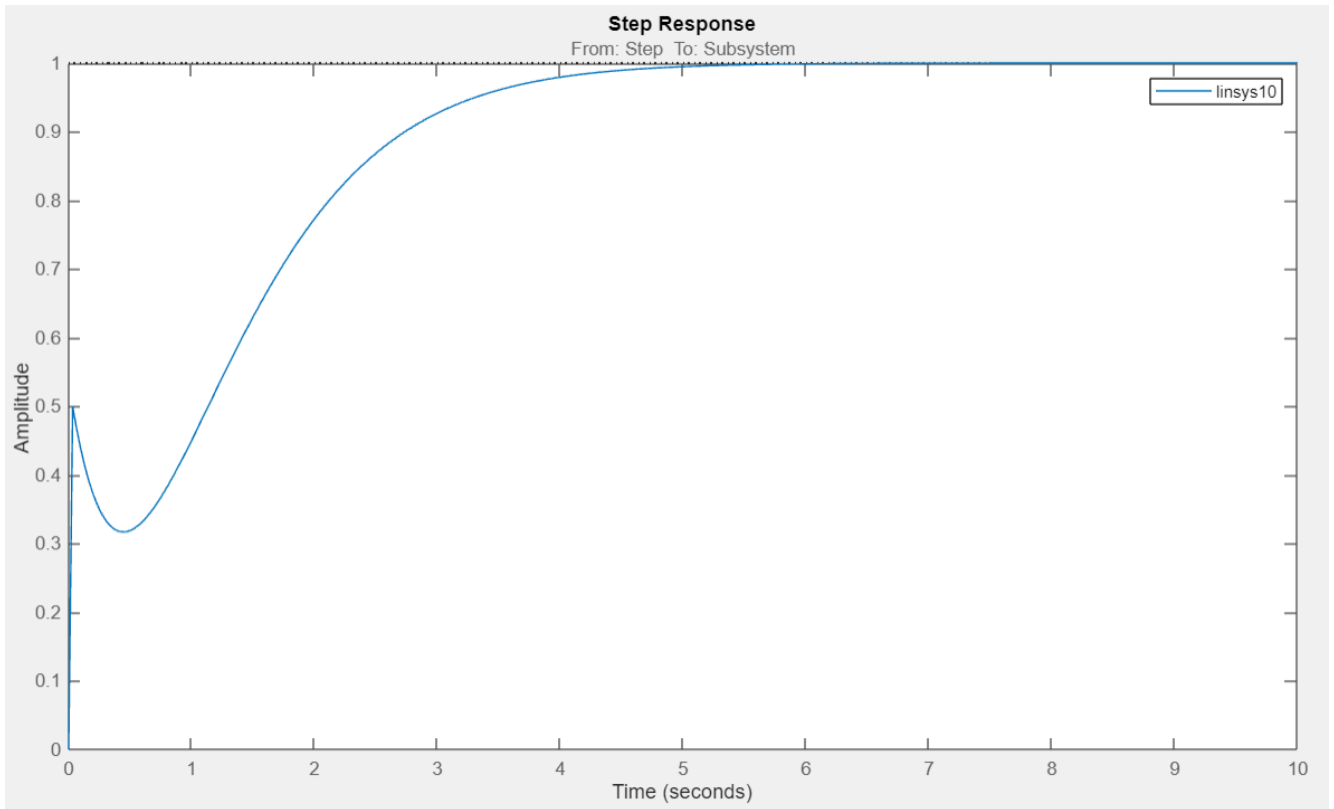


Рисунок 4.7 – Графік перехідної характеристики

На рисунку 4.8 зображено вікно налаштування ПІД-контролера із встановленим новим значення $K_d=0,0007$.

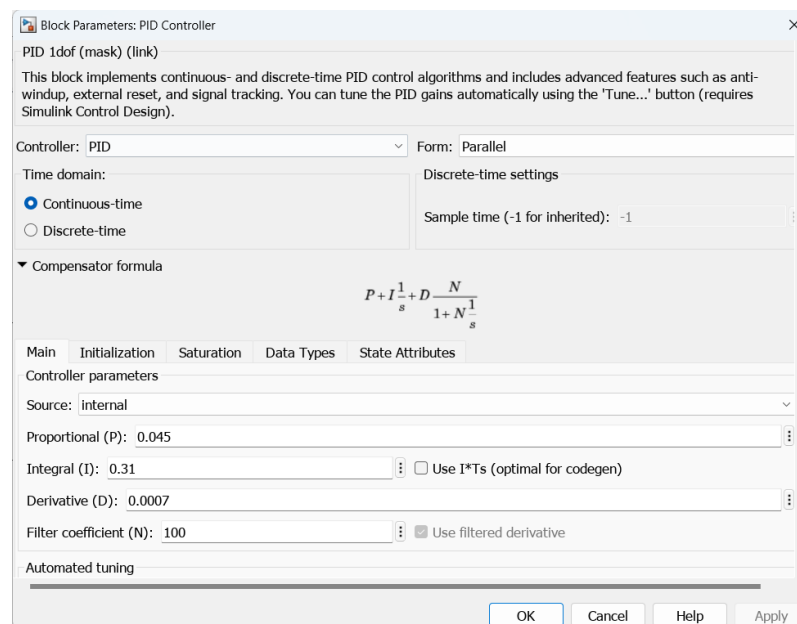


Рисунок 4.8 Вікно налаштування ПІД-контролера із встановленим новим значення $K_d=0,0007$

В результаті отримали задовільні графіки діаграми Бode та перехідної характеристики, які зображені на рисунку 4.9 та рисунку 4.10.

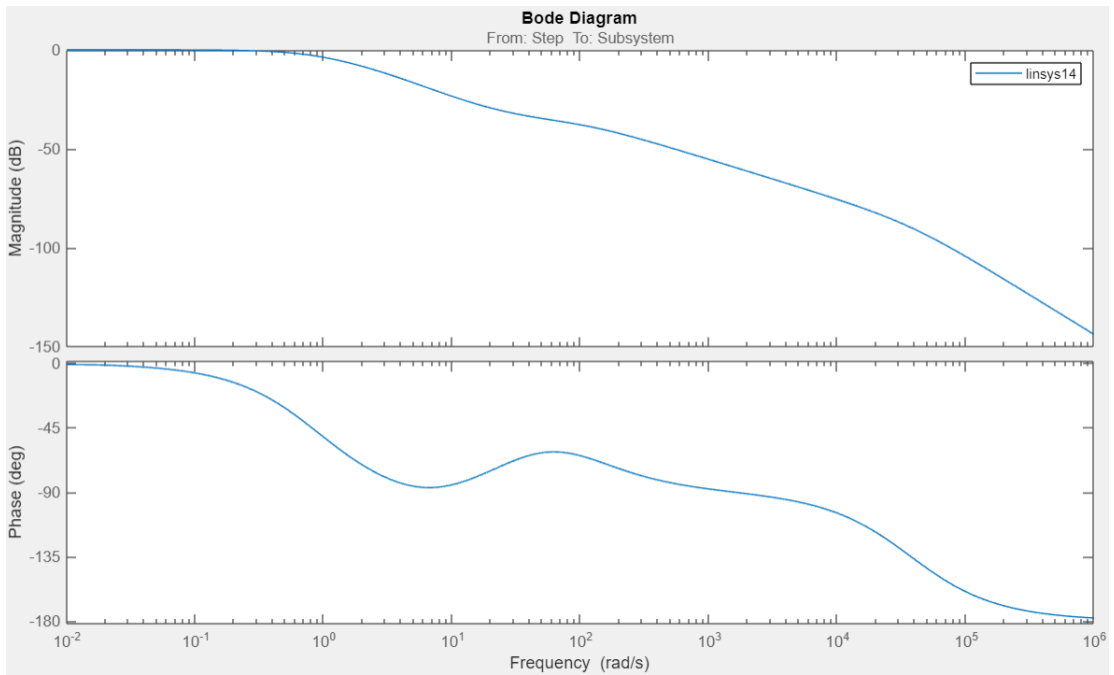


Рисунок 4.9 - Графік діаграми Бode ПД-контролера із встановленим новим значення $K_d=0,0007$

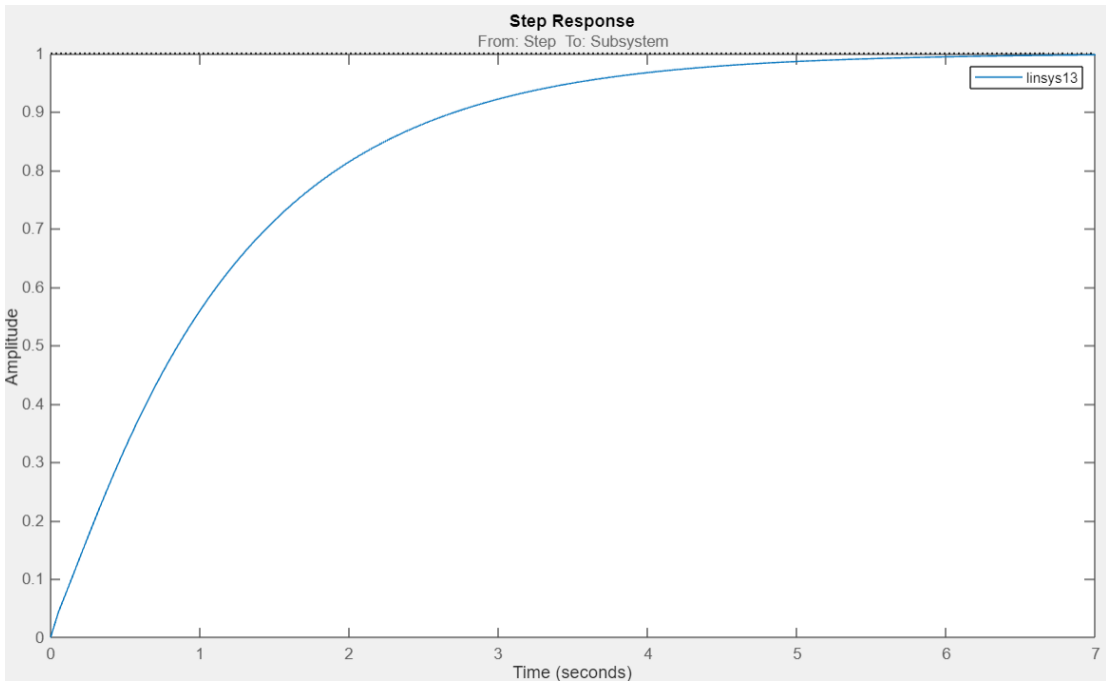


Рисунок 4.10 - Графік перехідної характеристики ПД-контролера із встановленим новим значення $K_d=0,0007$

4.3 Висновки до четвертого розділу

1. До складу імітаційної моделі удосконаленого методу керування електричним двигуном робота на основі ПД-регулятора входить ПД-регулятор та імітаційна модель розімкнутого контуру керування електричним двигуном робота.

2. В якості ПД-регулятора використовуємо стандартний блок PID(s) із бібліотеки Simulink/Continuous/PID Controller. Вихід блоку є зваженою сумою вхідного сигналу, інтеграла вхідного сигналу та похідної вхідного сигналу. Ваговими коефіцієнтами є пропорційні, інтегральні та похідні параметри посилення.

3. Метод критичної точки Зіглера-Ніколса (другий метод Зіглера-Ніколса) базується на знанні критичної точки процесу. Експериментально процес зациклюється на простому пропорційному регуляторі, коефіцієнт підсилення якого збільшується до тих пір, поки система не перейде в постійні коливання.

4. Коефіцієнт підсилення збільшується до тих пір, поки система не перейде в постійні коливання, тобто ми не опинимося на межі стійкості. Визначивши критичний коефіцієнт підсилення $K_{кр}$ регулятора та період часу, параметри обраного регулятора можна розрахувати за допомогою таблиці.

5. У другому методі Зіглера-Ніколса запропоновані значення призводять до відносно короткого часу наростання, тому при великому перерегулюванні така ситуація не завжди є задовільною. Далі доведеться скоригувати запропоновані коефіцієнти і, зокрема, зменшити коефіцієнт підсилення КР.

6. Аналізуючи графік діаграми Боде, можна зробити висновок, що амплітудна та фазова характеристики мають значні пульсації. Аналогічний висновок можна зробити, проаналізувавши графік перехідної характеристики.

7. Для зменшення пульсацій графіка діаграми Боде та перехідної характеристики замкнутого контуру керування електричним двигуном робота виконаємо повторне налаштування коефіцієнта $K_d=0,0007$, який відповідає за диференціювання сигналу помилки.

ВИСНОВКИ

1. Основною причиною використання широтно-імпульсної модуляції для керування двигунами постійного струму є уникнення надмірного тепловиділення в лінійних підсилювачах потужності. Проблема розсіювання тепла часто призводить до використання великих радіаторів, а іноді і до примусового охолодження.

2. Дуже важливо, що двигун постійного струму з якірним керуванням EMG30 оснащений датчиками, які надають дані для замкнутого контуру управління швидкістю і для отримання відносних вимірювань на основі розрахунку одометрії.

3. Основна ідея частотно-орієнтованого проектування полягає у використанні діаграми Боде передавальної функції розімкнутого контуру керування для оцінки реакції замкнутого контуру керування. Додавання контролера до системи змінює діаграму Боде у розімкнутого контуру, тим самим змінюючи реакцію замкнутого контуру.

4. Аналіз та порівняння діаграми Боде розімкнутого контуру керування та модифікованої діаграми Боде розімкнутого контуру керування та пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p=0,372$, показує, що введення пропорційного коефіцієнта підсилення (послаблення) $K_p=0,372$ покращило характеристику керування.

5. Метод критичної точки Зіглера-Ніколса (другий метод Зіглера-Ніколса) базується на знанні критичної точки процесу. Експериментально процес зациклюється на простому пропорційному регуляторі, коефіцієнт підсилення якого збільшується до тих пір, поки система не перейде в постійні коливання.

6. Для зменшення пульсацій графіка діаграми Боде та перехідної характеристики замкнутого контуру керування електричним двигуном робота виконаємо повторне налаштування коефіцієнта $K_d=0,0007$, який відповідає за диференціювання сигналу помилки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Белікова Л. Я. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів /Л. Я. Белікова, В. П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2012.– 480 с.
2. What is a Permanent Magnet DC Motor (PMDC Motor)? Режим доступу до ресурсу: <https://www.movematic.in/post/what-is-pmdc-motor>.
3. DC Motors Characteristics. Режим доступу до ресурсу: <https://electrical-engineering-portal.com/4-types-of-dc-motors-and-their-characteristics>.
4. What is a Series Wound DC Motor? Режим доступу до ресурсу: <https://www.electrical4u.com/series-wound-dc-motor-or-dc-series-motor>.
5. FAQ: What are DC shunt motors and where are they used? Режим доступу до ресурсу:
<https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-dc-shunt-motors-and-where-are-they-used>.
6. D.C. Compound Motor. Режим доступу до ресурсу: <https://electricallive.com/2015/02/dc-compound-motor.html>.
7. Пижов В.М. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Пижов, Н.Д. Красношарпа, М.Я. Островерхов – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 198 с.
8. Methods of Speed Control of a DC Motor. Режим доступу до ресурсу: <https://www.watelectrical.com/methods-of-speed-control-of-a-dc-motor>.
9. Motor speed regulation without encoder. Режим доступу до ресурсу: <http://evalspace.com/motor-speed-regulation-without-encoder>.
10. ASPINA. How are DC motors controlled? - Speed control of DC motors. Режим доступу до ресурсу: <https://us.aspina-group.com/en/learning-zone/columns/what-is/011>.

11. EMG30 - GearMotor with encoder. Режим доступа до ресурсу: <https://www.robot-electronics.co.uk/emg30-gearmotor-with-encoder.html>.
12. Gonçalves J. Modeling and simulation of the emg30 geared motor with encoder resorting to simtwo: the official robot@ factory simulator // J. Gonçalves, J. Lima, P. J. Costa, and A. P. Moreira, in *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems*, Springer, 2013, pp. 307–314.
13. Dionísio C.D. *Ground Mobile Vehicle Velocity Control using Encoders and Optical Flow Sensor Fusion* // C.D. Dionísio, Técnico Lisboa, 2016.
14. B. W. Bequette, *Process control: modeling, design, and simulation*. Prentice Hall Professional, 2003.
15. P. Meshram and R. G. Kanojiya, “Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor”, in *IEEE-international conference on advances in engineering, science and management (ICAESM-2012)*, IEEE, 2012, pp. 117–122.
16. El Ouanjli, N. Motahhir, S. Derouich, A. El Ghzizal, A. Chebabhi, A. Taoussi, M. Improved DTC strategy of doubly fed induction motor using fuzzy logic controller. *Energy Rep.* 2019, 5, 271–279.
17. Farahani G., Rahmani K. Speed Control of a Separately Excited DC Motor Using New Proposed Fuzzy Neural Algorithm Based on FOPID Controller. *J. Control. Autom. Electr. Syst.* 2019, 30, 728–740.
18. Husain Ahmed and Gagansingh, Controlling of D.C. Motor using Fuzzy Logic Controller, *Conference on Advances in Communication and Control Systems 2013 (CAC2S 2013)*.
19. K. T. Chau, "DC Motor Drives", *Electric Vehicle Machines and Drives: Design Analysis and Application*, pp. 19-38, 2015.
20. William H. Yeadon and Alan W. Yeadon, "Handbook of small electric motors" in , McGraw-Hill Professional, pp. 4-134, 2001.
21. K. Hatipoglu, M. Lu, A. Naz, Y. M. Panta and S. K. Blevins, "Development of an Integrated Electro-mechanical Energy Conversion System to

Support Undergraduate Electrical Engineering Curriculum", 2017 ASEE Annual Conference & Exposition, 2017, June.

22. Hang Wu; Weihua Su; Zhiguo Liu, "PID controllers: Design and tuning methods," *Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2014 IEEE 9th Conference on ,vol.,no.,pp.808,813,9-11 June 2014.

23. AdityaPratap Singh, "Speed Control of DC Motor PID Controller Based on Mat lab" *International Conference on Recent Trends in Applied Sciences with Engineering Applications*, Vol.4, No.6, 2013.

24. Dahl, Nicolai Jerram; Iversen, NielsElkjær; Knott, Arnold; Andersen, Michael A. E. "Comparision of Simple Self-Oscillating PWM Modulators". Published in: *Proceedings of the 140th Audio Engineering Convention Convention*.

25. S. Poulsen, M. A. E. Andersed Ørsted. "Self Oscillating PWM Modulators ,A Topological Comparision", *DTU Automation, Technical University of Denmark Eiehoevej, Building 325, 2800 Lyngby, Denmark*.

26. Batool, A.; Ain, N.U.; Amin, A.A.; Adnan, M.; Shahbaz, M.H. A comparative study of DC servo motor parameter estimation using various techniques. *Automatika* 2022, 63, 303–312.

27. Usman, H.M.; Mukhopadhyay, S.; Rehman, H. Permanent magnet DC motor parameters estimation via universal adaptive stabilization. *Control Eng. Pract.* 2019, 90, 50–62.

29. Wu, W. DC Motor Parameters Identification Using Speed Step Response. *Model. Simul. Eng.* 2012, 2012, 189757.

30. Hadeif, M.; Mekideche, M.R. Parameter identification of a separately excited dc motor via inverse problem methodology. *Turk. J. Electr. Eng. Comp. Sci.* 2009, 17, 99–106.

31. Shanmuga, N.B.; Mythile, A.; Pavithra, S.; Nivetha, N. Parameter Identification of a DC Motor. *Int. J. Sci. Technol. Res.* 2020, 9, 2.

32. Amiri, M.S.; Ibrahim, M.F.; Ramli, R. Optimal parameter estimation for a DC motor using genetic algorithm. *Int. J. Power Electron. Drive Syst.* 2020, 11, 1047–1054.

33. Dupuis, A.; Ghribi, M.; Kaddouri, A. Multiobjective genetic estimation of DC motor parameters and load torque. In Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04., Hammamet, Tunisia, 8–10 December 2004; Volume 3, pp. 1511–1514.
34. Wu, W. DC motor identification using speed step responses. In Proceedings of the IEEE American Control Conference (ACC), Baltimore, MD, USA, 30 June–2 July 2010; pp. 1937–1941.
35. Awoda, M.L.; Ramzy, S.A. Parameter Estimation of a Permanent Magnets DC motor. *Iraqi J. Electr. Electron. Eng.* 2019, 15, 28–36.
36. Lin, Y.-H. Improvement and Implementation of Model Identification for Permanent Magnet DC Motors. Master's Thesis, National Kaohsiung University of Science and Technology, Kaohsiung, Taiwan, 2020.
37. Arshad, S.; Qamar, S.; Jabbar, T.; Malik, A. Parameter Estimation of a DC Motor Using Ordinary Least Squares and Recursive Least Squares Algorithms. In Proceedings of the 8th International Conference on Frontiers of Information Technology, Islamabad, Pakistan, 12–13 December 2010.
38. Li, M.; Ma, Y. Parameter Identification of DC Motor based on Compound Least Square Method. In Proceedings of the 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China, 12–14 June 2020; pp. 1107–1111.
39. Gao, D.; Wu, S.; Yu, J.; Wang, M.; Wang, Y. Parameter identification of DC motor model based on improved dynamic forgetting factor recursive least squares method. In Proceedings of the 2022 IEEE 8th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA), Melaka, Malaysia, 26–28 September 2022; pp. 282–286.
40. Hsueh, P.-W.; Tseng, C.-M.; Lin, Y.-H. Improvement of Model Identification for Permanent Magnet DC Servo Motors. In Proceedings of the 18th International Conference on Automation Technology (Automation 2021), Online, 6–8 July 2021.

Додаток А

Стаття у фаховому журналі (подана в 1 номер ВОРТТІ, 2024р.)

МАРТИНЮК Валерій
Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0001-5758-4244
e-mail: martynyuk.valeriy@gmail.com

МЕДВЕДЧУК Неля
Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0003-1337-2121
e-mail: medvedchuk.nelya@gmail.com

БОРТНИК Василь
Хмельницький національний університет
e-mail: vasya1361@gmail.com

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ РОБОТА

У статті проаналізована математична модель двигуна постійного струму робота з якорем і прямим приводом навантаження. Розроблена імітаційна модель двигуна постійного струму робота в середовищі MATLAB/SIMULINK. В результаті імітаційного моделювання двигуна постійного струму робота в середовищі MATLAB/SIMULINK отримали графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна робота. Аналіз графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна показує, що крутний момент двигуна постійного струму робота лінійно зменшується при збільшенні частоти обертання двигуна. Також в результаті імітаційного моделювання двигуна постійного струму робота в середовищі MATLAB/SIMULINK отримали графік залежності потужності від швидкості обертання двигуна робота.

Ключові слова: математична модель двигуна постійного струму робота з якорем і прямим приводом навантаження, імітаційна модель двигуна постійного струму робота.

MARTYNYUK Valeriy, MEDVEDCHUK Nelya, BORTNIK Vasyl
Khmelnitsky national university, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF THE ROBOT MOTOR CONTROL SYSTEM

The paper analyzes the mathematical model of a robot DC motor with an armature and direct load drive. A simulation model of a robot DC motor was developed in the MATLAB/SIMULINK environment. As a result of simulated modeling of the DC motor of the robot in the MATLAB/SIMULINK environment, a graph of the dependence of the torque on the rotational speed of the robot motor was obtained. Analysis of graphs of the dependence of the torque on the engine speed shows that the torque of the DC motor of the robot decreases linearly with an increase in the engine speed. Also, as a result of simulation modeling of the robot's direct current motor in the MATLAB/SIMULINK environment, we obtained a graph of the dependence of power on the speed of rotation of the robot's motor..

Keywords: mathematical model of a robot DC motor with armature and direct load drive, simulation model of a robot DC motor.

Постановка проблеми

Вибір приводного двигуна для використання в робототехніці є важливим для отримання заданих характеристик робота та ефективної системи керування. Двигуни постійного струму характеризуються високим крутним моментом та дозволяють здійснювати ефективне керування частотою обертання та крутним моментом в широких межах. Звідси можна зробити висновок, що використання двигунів постійного струму для керування роботами є ефективним, а розробка математичної моделі системи керування двигуном робота є актуальною задачею.

Для керування електричним двигуном робота оберемо двигун постійного струму з якірним керуванням, який поводить себе як машина першого порядку, коли напруга на якорі є вхідним сигналом, а кутова швидкість – вихідним сигналом. Для того, щоб експериментально перевірити зміну реакції системи керування електричним двигуном робота, необхідно визначити передавальну функцію двигуна постійного струму.

Аналіз останніх джерел

Дуже важливо, щоб двигун постійного струму з якірним керуванням був оснащений датчиками, які надають дані для замкнутого контуру управління швидкістю і для отримання відносних вимірювань на основі розрахунку одометрії [1].

Одометрія (лат. вимірювання відстані) - є основним методом, який використовують роботи для навігації. Вимірювати час легко за допомогою внутрішнього годинника вбудованого комп'ютера. Вимірювати швидкість складніше: в деяких навчальних роботах кодери коліс використовуються для підрахунку обертів коліс, а в інших швидкість оцінюється за властивостями двигунів [2].

Розглянемо математичну модель системи позиціонування двигуна постійного струму робота. Цей привід системи керування є двигуном постійного струму робота з постійним магнітом, керованим якорем. На рис. 1

показана динамічна модель двигуна робота, керованого якорем. Ця модель передбачає, що двигун робота приводить в рух механічне навантаження безпосередньо від свого вала.

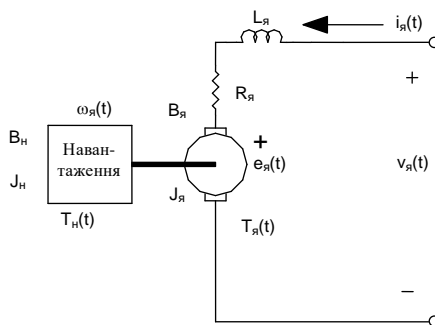


Рис. 1. Математична модель двигуна постійного струму робота з якорем і прямим приводом навантаження

Математична модель двигуна постійного струму робота з якорним керуванням описується рівнянням [3]:

$$\begin{cases} \frac{di_a(t)}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} \cdot i_a(t) - \frac{K_e}{L_a} \cdot \omega_a(t) + \frac{u_a(t)}{L_a} \\ \frac{d\omega_a(t)}{dt} = \frac{K_m}{J_a + J_n} \cdot i_a(t) - \frac{B_a + B_n}{J_a + J_n} \cdot \omega_a(t) - \frac{T_n(t)}{J_a + J_n} \end{cases}, \quad (1)$$

де $u_a(t)$ - напруга якоря;

$i_a(t)$ - струм якоря;

$\omega_a(t)$ - кутова частота обертання якоря двигуна постійного струму робота;

R_a - еквівалентний опір якоря;

L_a - еквівалентна індуктивність якоря;

K_e - електрична константа двигуна постійного струму робота;

K_m - константа крутного моменту двигуна постійного струму робота;

J_a - момент інерції якоря;

J_n - момент інерції навантаження;

B_a - в'язке тертя якоря двигуна;

B_n - в'язке тертя навантаження;

$T_n(t)$ - момент механічного навантаження.

У цих рівняннях струм якоря та кутова частота обертання двигуна постійного струму робота повністю визначають реакцію двигуна на навантаження. Напруга якоря та крутний момент навантаження двигуна постійного струму робота є вхідними параметрами системи.

Розв'язок цієї системи диференціальних рівнянь, які в теорії систем керування називають рівняннями стану, дозволяє отримати графіки струму якоря та кутової частоти обертання двигуна постійного струму робота в залежності від часу.

Перше рівняння системи описує електричну динаміку двигуна постійного струму робота та включає індуктивну постійну часу, яка обмежує швидкість, з якою струм може змінюватися в якорі двигуна постійного струму робота. Simulink використовує рівняння в цій формі, модифіковані для чисельного інтегрування в комп'ютері, для створення графіків відгуків.

Друге рівняння системи описує механічну динаміку. Це рівняння містить механічну постійну часу, представлену відношенням загального в'язкого демпфування $B_a + B_n$ до повної обертової інерції $J_a + J_n$. Це співвідношення визначає, наскільки швидко може змінюватися швидкість двигуна/навантаження.

Систему рівнянь (1) можна перетворити, використовуючи вирази (2) і (3), в результаті отримаємо систему рівнянь (4).

$$T_a(t) = K_m \cdot i_a(t), \quad (2)$$

$$e_a(t) = K_e \cdot \omega_a(t), \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_a(t) - e_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + i_a(t) \cdot R_a \\ T_a(t) = (J_a + J_n) \frac{d\omega_a(t)}{dt} + (B_a + B_n) \cdot \omega_a(t) + T_n(t) \end{cases}. \quad (4)$$

де $e_a(t)$ - зворотна ЕРС якоря двигуна постійного струму робота.

Виконаємо перетворення Лапласа рівнянь (2 - 4) отримаємо рівняння (5 - 8).

$$T_a(s) = K_m \cdot I_a(s), \quad (5)$$

$$E_a(s) = K_e \cdot \omega_a(s), \quad (6)$$

$$\begin{cases} I_{\text{я}}(s) = \frac{1}{L_{\text{я}}s + R_{\text{я}}} \cdot (U_{\text{я}}(s) - E_{\text{я}}(s)) \\ \Omega_{\text{я}}(s) = \frac{1}{J_{\text{екв}}s + B_{\text{екв}}} \cdot (T_{\text{я}}(s) - T_{\text{н}}(s)) \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} J_{\text{екв}} = J_{\text{я}} + J_{\text{н}} \\ B_{\text{екв}} = B_{\text{я}} + B_{\text{н}} \end{cases}, \quad (8)$$

де $J_{\text{екв}}$ - еквівалентний момент інерції якоря та навантаження;
 $B_{\text{екв}}$ - еквівалентний в'язке тертя якоря та навантаження.

Виклад основного матеріалу

Блок-схема двигуна постійного струму робота, керованого якорем, із прямим зв'язаним навантаженням зображена на рис. 2.

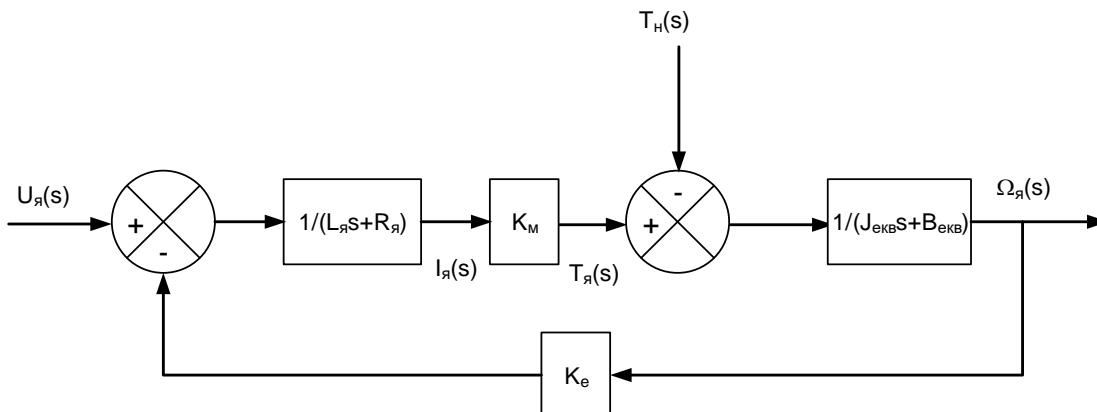


Рис. 2. Блок-схема двигуна постійного струму робота, керованого якорем, із прямим зв'язаним навантаженням

На рис. 2 показано, що різниця між напругою якоря $U_{\text{я}}(s)$ та зворотною ЕРС $E_{\text{я}}(s)$ створює різницю напруг, яка визначає струм якоря. Значення $L_{\text{я}}(s)$ і $R_{\text{я}}(s)$ визначають величину і швидкість зміни цього струму.

Константа крутного моменту $K_{\text{м}}$ перетворює струм якоря в крутний момент якоря двигуна $T_{\text{я}}(s)$. Різниця між крутним моментом якоря двигуна $T_{\text{я}}(s)$ та крутним моментом навантаження $T_{\text{н}}(s)$ створює крутний момент, який визначає кутову частоту обертання якоря двигуна постійного струму робота. Значення $J_{\text{екв}}$ і $B_{\text{екв}}$ визначають величину і швидкість зміни кутової частоти обертання якоря двигуна постійного струму робота.

Дослідження імітаційної моделі двигуна постійного струму робота виконано в середовищі MATLAB/SIMULINK із використанням бібліотеки Simscape. Імітаційна модель двигуна постійного струму робота в середовищі MATLAB/SIMULINK зображена на рис. 3.

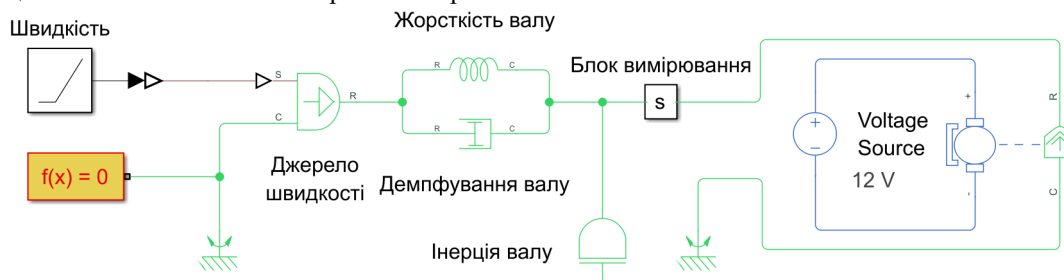


Рис. 3. Імітаційна модель двигуна постійного струму робота в середовищі MATLAB/SIMULINK

В результаті імітаційного моделювання двигуна постійного струму EMG30 в середовищі MATLAB/SIMULINK отримали графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна, який зображено на рис. 4. Аналіз графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна показує, що крутний момент двигуна постійного струму робота лінійно зменшується при збільшенні частоти обертання двигуна.

Також в результаті імітаційного моделювання двигуна постійного струму EMG30 в середовищі MATLAB/SIMULINK отримали графік залежності потужності від швидкості обертання двигуна, який зображено на рис. 5. Аналіз графік залежності потужності від швидкості обертання двигуна показує, що крутний момент двигуна постійного струму робота нелінійно зростає при збільшенні частоти обертання двигуна.

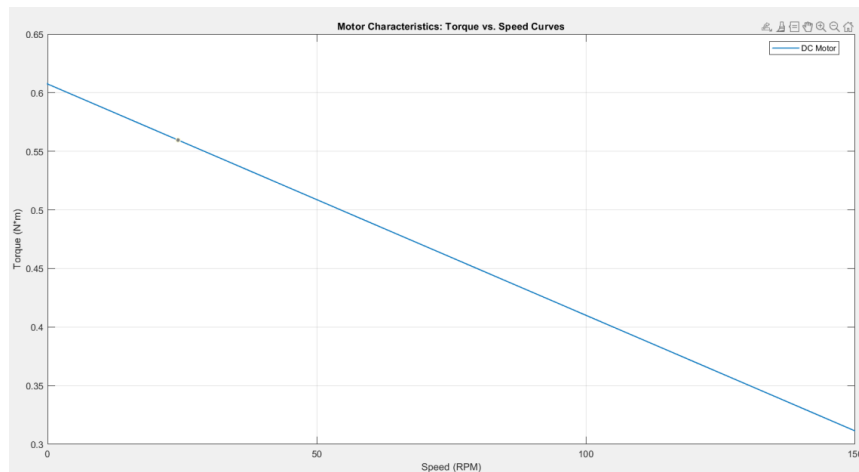


Рис. 4. Графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна робота

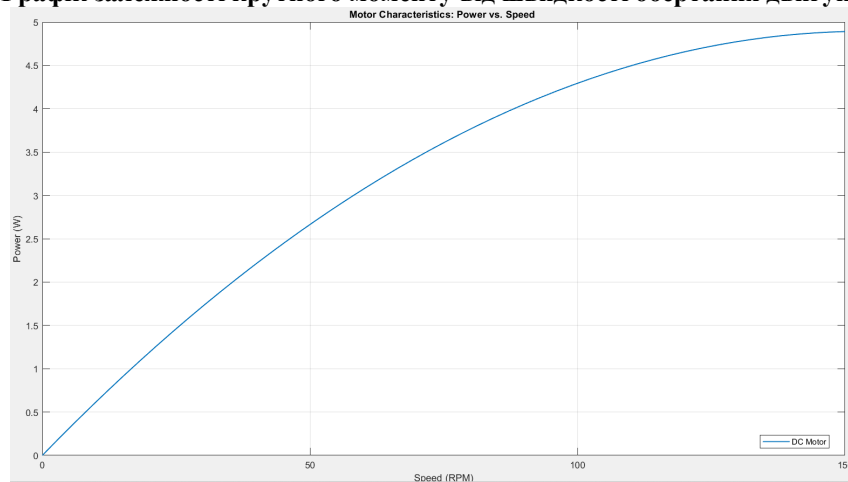


Рис. 5. Графік залежності потужності від швидкості обертання двигуна робота

Висновки

Проаналізована математична модель двигуна постійного струму робота з якорем і прямим приводом навантаження. Розроблена імітаційна модель двигуна постійного струму робота в середовищі MATLAB/SIMULINK. В результаті імітаційного моделювання двигуна постійного струму робота в середовищі MATLAB/SIMULINK отримали графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна робота. Аналіз графік залежності крутного моменту від швидкості обертання двигуна показує, що крутний момент двигуна постійного струму робота лінійно зменшується при збільшенні частоти обертання двигуна. Також в результаті імітаційного моделювання двигуна постійного струму робота в середовищі MATLAB/SIMULINK отримали графік залежності потужності від швидкості обертання двигуна робота.

Література:

1. Dionisio C.D. Ground Mobile Vehicle Velocity Control using Encoders and Optical Flow Sensor Fusion // C.D. Dionisio, Técnico Lisboa, 2016.
2. Рудик А. В. Аналіз одометричних методів визначення параметрів руху мобільних роботів / А. В. Рудик, В. А. Рудик, М. І. Матей // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – №2. – С. 107-115.
3. Чорний О.П. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В.– Кременчук, 2001. – 410 с.
4. Pratyusha B. Dynamic Model Analysis of a DC Motor in MATLAB / Pratyusha B., Oindrila S., Sajan S., Shaon P. International // Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 3, March-2017. P. 57.

References

1. Dionisio C.D. Ground Mobile Vehicle Velocity Control using Encoders and Optical Flow Sensor Fusion // C.D. Dionisio, Técnico Lisboa, 2016.
2. A. V. Rudyk Analysis of odometric methods for determining the movement parameters of mobile robots / A. V. Rudyk, V. A. Rudyk, M. I. Matei // Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine. – 2019. – No. 2. - P. 107-115.
3. Chorny O.P. Modeling of electromechanical systems: Textbook / Chorny O.P., Lugovyi A.V., Rodkin D.J., Sysyuk G.Y., Sadovyi O.V. - Kremenchuk, 2001. – 410 p.
4. Pratyusha B. Dynamic Model Analysis of a DC Motor in MATLAB / Pratyusha B., Oindrila S., Sajan S., Shaon P. International // Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 3, March-2017. P. 57.

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Бортнік Василь Вікторович

Тема: Удосконалений метод керування електричним двигуном робота

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 17 Кількість сторінок записки 78

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Математична модель процесу керування електричним двигуном робота. Імітаційна модель удосконаленого методу керування електричним двигуном робота. Експериментальні дослідження удосконаленого методу керування електричним двигуном робота. Висновки.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі були розглянуті наступні питання: будова і принцип роботи електричного двигуна робота. У другому розділі розроблено математичну модель процесу керування електричним двигуном робота. У третьому розділі розроблено імітаційну модель удосконаленого методу керування електричним двигуном робота. У четвертому розділі проведені експериментальні дослідження удосконаленого методу керування електричним двигуном робота.
4. Позитивні сторони роботи: використання стандартного блоку PID(s) із бібліотеки Simulink/Continuous/PID Controller. Вихід блоку є зваженою сумою вхідного сигналу, інтеграла вхідного сигналу та похідної вхідного сигналу.

5. Негативні сторони роботи: у роботі недостатньо уваги приділяється огляду існуючих технічних рішень

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: добре (4,00/С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи)

Клобу Юрій Павлович, к.т.н., доцент, зав. кафедрою
кадрової підготовки

"19" грудня 2023 р.

 (підпис)

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Удосконалений метод керування електричним двигуном робота

Автор: Бортнік Василь Вікторович

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Науковий керівник: Мартинюк Валерій Володимирович, доктор технічних наук, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укривтя запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальнонавчаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

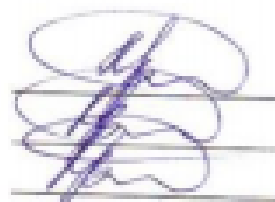
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 3,1% і адресується до 74 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Дата 29.12.2023р.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Завідувачу кафедри АКІТгаР
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Бортнік В.В.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТм-22-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

10.12.2023р.

дата



підпис

Anti-Plagiarism v-15.257**Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%****Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 6%**

ID: 124878 Назва: МКР Удосконалений метод керування електричним двигуном робота Додано в БД: 2023-12-27 Автора: Василь БОРТНІК Керівники: Валерій МАРТИНЮК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	79996	624	1373 (2%)	19 (3%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Ім'я користувача:
Кафедра АКІПТК

ID перевірки:
1016037995

Дата перевірки:
27.12.2023 11:40:39 EET

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
27.12.2023 11:53:26 EET

ID користувача:
100005862

Назва документа: Бортнік_кваліфікаційна_робота_остаточна

Кількість сторінок: 83 Кількість слів: 12429 Кількість символів: 95581 Розмір файлу: 2.59 MB ID файлу: 1015731167

359 слів позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

3.1% Схожість

Найбільша схожість: 1.13% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1015731169)

1.31% Джерела з Інтернету 69 Сторінка 85

1.98% Джерела з Бібліотеки 5 Сторінка 86

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнено

Посилання 1 Сторінка 86

0% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 8 слів та 0%)

0% Вилучення з Інтернету 8 Сторінка 87

0% Вилученого тексту з Бібліотеки 7 Сторінка 87

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 46